ISSN 0554-2111 (Impreso) ISSN 2244-8888 (En línea)

Pittieria
40
2016 ENERO-DICIEMBRE
pp. 54—93

DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS CUANTITATIVAS DE LA MADERA MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

DETERMINATION OF WOOD ANATOMICAL QUANTITATIVE FEATURES BY MEANS OF GEOGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGY

por

NATHALIA M. BARRIOS P.,
WILLIAMS J. LEÓN H.
Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,
Laboratorio de Anatomía de Maderas, Mérida, Venezuela.
nathaliabarriosp@gmail.com / **wleon@ula.ve**

CARLOS E. PACHECO A.
Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,
Escuela Técnica Superior Forestal, Mérida, Venezuela.
carlosa@ula.ve

RECIBIDO: octubre 29 de 2015 / **ACEPTADO:** febrero 28 de 2016

RESUMEN

Se determinaron características xilemáticas cuantitativas utilizando Tecnologías de Información Geográfica (TIG) específicamente un Sistema de Procesamiento Digital de Imágenes (SPDI) y un Sistema de Información Geográfica (SIG) en fotomicrografías de *Hymenaea courbaril* L., *Erisma uncinatum* Warm., *Gmelina arborea* Roxb. y *Pachira quinata* (Jacq.) W. S. Alverson. Para ello se aplicaron tres metodologías: la primera, enfocada en las mediciones lineales de la sección transversal, tangencial y tejido macerado, a través del método tradicional y el digital; mientras que la segunda y la tercera, se orientaron hacia el estudio de proporciones, mediante una interpretación visual en pantalla y un procesamiento semiautomático respectivamente, ambos comparados con la medición directa ejecutada con el planímetro digital. Las características estudiadas fueron las siguientes: proporción de tejidos xilemáticos (vasos, parénquima axial, fibras, radios), frecuencia y diámetro de poros, longitud de elementos vasculares, diámetro de punteaduras, longitud de fibras, frecuencia y altura de radios. Para comparar cada metodología se utilizaron estadísticos descriptivos como la media, desviación típica, valores máximos y mínimos, los coeficientes de variación, el tiempo empleado (min) para realizar cada una de las mediciones, el análisis de varianza (ANOVA) y el contraste Post-Hoc de Tukey (α = 0,01) en los casos en que fuese necesario. La validación a través del cálculo de una matriz de confusión que permitió determinar errores de confusión, omisión y la precisión global, el estadístico K y el error medio cuadrático (REMC), empleado para calcular un error de diferencias entre los métodos utilizados en la determinación de proporciones del tejido leñoso. Los resultados obtenidos en las mediciones lineales, de acuerdo al análisis de varianza, indican que los métodos de medición (directo y digital) son similares, mientras que el tiempo empleado fue mayor para casi todos los elementos cuantificados por especie utilizando el método directo. Con respecto a la proporción de tejidos, la interpretación digital arrojó resultados similares al método manual. Por el contrario, el método semiautomático sólo mostró resultados confiables en la proporción de poros.

PALABRAS CLAVE: anatomía cuantitativa, anatomía de maderas, fotomicrografías, TIG, SPDI, SIG.

ABSTRACT

Quantitative wood anatomical features are measured using Geographic Information Technology (GIT), specifically a Digital Images Processing System (DIPS) and a Geographic Processing System (GPS) in micrographs of *Hymenaea courbaril* L., *Erisma uncinatum* Warm., *Gmelina arborea* Roxb. y *Pachira quinata* (Jacq.) W. S. Alverson. Three methodologies are used: first, a lineal measuring in tranverse section, tangential section and macerated tissue, using a traditional method (optical microscope). Second and third methodology was for study tissue proportions with a visual interpretation on screen (second method) and a semiautomatical processing (third method). Proportions measures with second and third methods are compared with a direct method using a digital planimeter. The following features are studied: xylematic proportions tissues (vessels, axial parenchyma, fibres, rays), vessels frequency, vessels diameter, vessel element length, pits diameter, fibre length, rays frequency and rays height. Comparations between direct and digital methodologies are presented with a statistical analysis, for lineal measures, based in ANOVA, Tukey test (α = 0.05). For proportions tissues, comparations are presented with the following tools: validation with a confussion matrix, confussion error, omission error, global precission, K statistical and mean square error. In lineal measures, direct and digital methodologies are similars according Tukey test and measures times are superior with application of direct method (optical microscope). In tissues proportions, direct and digital methodologies are similar according Tukey test and semiautomatical methodology shows confiable results only for vessel proportion.

KEY WORDS: quantitative wood anatomy, anatomy of wood, photomicrographies, TGI, DIPS, GPS.

INTRODUCCIÓN

En los estudios de anatomía del xilema secundario, la determinación de características cuantitativas juega un papel importante tanto para aspectos taxonómicos como ecoanatómicos o en relaciones con tecnología de la madera. La metodología más aplicada en su determinación es la realización de mediciones directas con el uso de microscopio óptico: para cada elemento se deben realizar un número de mediciones que garanticen que el resultado obtenido sea representativo del individuo bajo estudio. En el caso de cálculo de proporciones de tejidos se deben tomar fotomicrografías, transferir la delimitación de tejidos a láminas de acetato y, posteriormente, hacer uso de planímetro digital para la obtención de áreas. Lógicamente, esto permite obtener resultados precisos pero acompañado de un gran cansancio visual y un tiempo relativamente largo. Con el paso de los años, las metodologías utilizadas en la cuantificación de elementos xilemáticos han evolucionado, implementándose técnicas que involucran la automatización de procesos con ayuda de sensores ópticos-electrónicos, la toma de fotografías de láminas para estudio microscópico y la interpretación visual en pantalla de ésta en una computadora, en la cual se pueden ejecutar algoritmos que facilitan la interpretación de los elementos anatómicos y las mediciones en un corto tiempo (Niskanen *et al*., 2001). La metodología tradicional a menudo es poco práctica cuando se necesita la obtención rápida de datos cuantitativos sobre las características anatómicas de las especies.

En el campo de la anatomía de maderas, el uso de programas de computación ha tenido diversas aplicaciones, siendo la principal la orientada hacia usos taxonómicos. Desde la década de los ochenta del siglo pasado, con la masificación del uso de computadoras, se comenzaron a desarrollar algunos programas que, de manera exitosa, han sido aplicados con fines taxonómicos y la mayoría de ellos se han basado en la lista de descripción de maderas de IAWA Committee (1989). Algunos aportes importantes son los presentados por Miller (1980), Kuroda (1987), Espinoza y Quintero (1988), Pasha y Wheeler (1987), Espinoza y Miller (1991) e Ilic (1993).

Investigadores como Fujiwara *et al*. (1991) y Fujiwara (1992) comenzaron a implementar el análisis de imágenes como herramienta metodológica en la determinación de proporciones de tejidos para conocer su relación sobre algunas propiedades de la madera. Donaldson y Lausberg (1998) cuantificaron el grosor de paredes y diámetro (radial y tangencial) de traqueídas; así como la proporción de área ocupada por la pared y el lumen, mediante técnicas de análisis de imágenes. Herrera *et al*. (2002), Rosado (2004) y Espinoza y Herrera (2013), presentan la clasificación y caracterización de maderas por medio del estudio de imágenes microanatómicas a través de procesamiento digital. Steppe *et al*. (2004) utilizaron rayos X y microtomografía computarizada (microCT) en *Fagus sylvatica* L. y *Quercus robur* L. para determinar automáticamente los diámetros de vasos, área de sección transversal de la superficie de los vasos, la densidad de los vasos y la porosidad. Los resultados obtenidos de forma automática no mostraron diferencias estadísticamente significativas en comparación con las mediciones manuales confirmando con ello que el análisis

anatómico de micrografías ópticas puede ser sustituido por el uso automatizado de microCT.

Más recientemente, Calderón (2010) determinó la longitud y espesor de pared de las fibras, diámetro y frecuencia de poros, diámetro de punteaduras, altura y frecuencia de radios, proporciones de fibras, poros, parénquima y radios en *Gmelina arborea* utilizando el método tradicional y un sistema digital de fotomicrografías apoyado por el software libre Gvsig en diferentes versiones (9.0, 10.0 y 11.0). González *et al.* (2011) implementaron una técnica que permitió describir la morfología de los vasos y el crecimiento anual (anillos) en la madera de frutales caducifolios, específicamente en *Carya illinoinensis* Koch, utilizando un sistema analizador de imagen (digitalización).

Rosero *et al.* (2011) utilizaron técnicas para el análisis de imágenes digitales que logran caracterizar y medir los elementos xilemáticos de especies forestales mediante la identificación de patrones y objetos. De acuerdo con Espinosa y Herrera (2013) la segmentación de poros en imágenes de microanatomía de madera, usando procesamiento digital de imágenes, se realiza con el fin de separar características relevantes durante las técnicas de análisis de cada especie; empleando en primera instancia un análisis de texturas mediante el uso de una matriz de concurrencia de niveles de gris para encontrar regiones que pertenezcan a poros, seleccionando éstas con el algoritmo de agrupamiento de k-medias para finalmente obtener una segmentación más cercana a los bordes reales de los poros e implementado el algoritmo de contornos activos. Scholz *et al.* (2013) mencionan el uso del programa WinCELL Imagen PRO-Plus para la cuantificación de los vasos y traqueidas e indican que la implementación del mismo es una herramienta versátil y rápida que agiliza el proceso para la obtención de datos de estos elementos anatómicos de la madera.

Espinosa *et al.* (2015) realizaron una de las más actuales investigaciones en este campo, implementando una segmentación de elementos anatómicos de *Gaiadendron punctatum* en imágenes microscópicas de madera usando técnicas de visión artificial. En este trabajo se presentó un método novedoso de segmentación de poros, radios y fibras utilizando un conjunto de algoritmos de visión artificial acordes a las características de cada elemento: para los poros se usó un descriptor de texturas, un algoritmo de agrupamiento y contornos activos; para los radios se utilizaron morfología matemática y filtros de Gabor para destacarlos y para segmentar se procedió en tres pasos: agrupamiento mean-shift, un muestrador de Gibbs y las fibras fueron tomadas como el excedente de los procesos de segmentación anteriores.

La utilización de herramientas de medición computarizadas han venido evolucionando rápidamente en los últimos años y el objetivo de este trabajo es determinar las características anatómicas cuantitativas de la madera aplicando Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) mediante un Sistema de Procesamiento Digital de Imágenes (SPDI) y un Sistema de Información Geográfica (SIG) en fotomicrografías de *Hymenaea courbaril* L., *Erisma uncinatum* Warm., *Gmelina arborea*

Roxb. y *Pachira quinata* (Jacq.) W. S. Alverson. Asimismo, se compararán las aplicaciones automatizadas y las directas (métodos tradicionales de medición) mediante análisis estadístico, con el fin de validar este proceso como un instrumento práctico para el estudio microscópico de los elementos xilemáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material de estudio está representado por muestras de madera de cuatro especies de valor comercial desde el punto de vista forestal *[CUADRO 1]* las cuales pertenecen a la colección permanente de la xiloteca MERw del Laboratorio de Anatomía de Maderas de la Universidad de Los Andes. Por cada especie se estudiaron dos individuos y se prepararon secciones de observación microscópica mediante la aplicación de procedimientos convencionales de microtecnia xilemática (Corothie, 1968). Para la preparación de tejido macerado se siguió la metodología de Franklin (1937). Tanto para las secciones como para el tejido macerado, se tomaron fotomicrografías con una cámara Pixelink (resolución de 1.280 x 1.024 px, velocidad de fotografía de 107 FPS, capacidad de 8-10 bits de almacenamiento e interfaz USB 2.0), acoplada a un microscopio óptico Nikon E-200. Las características cuantitativas a estudiar fueron las siguientes: proporción de los diferentes tejidos xilemáticos (vasos, fibras, parénquima axial, radios), diámetro y frecuencia de vasos, diámetro de punteaduras, longitud de fibras y elementos vasculares, grosor de paredes de las fibras, altura y frecuencia de radios. Esto se realizó mediante tres metodologías: la primera enfocada en las mediciones lineales de la sección transversal, tangencial y tejido macerado, a través del método directo o tradicional y el digital. Por su parte la segunda y la tercera se orientaron hacia el estudio de proporciones a través de una interpretación visual en pantalla y el procesamiento semiautomático correspondientemente, comparados al final con la medición directa ejecutada con el planímetro digital.

Con el método tradicional, para el caso de las mediciones lineales se utilizó un microscopio óptico Leica Galen III debidamente calibrado y para el estudio de proporciones se utilizó un planímetro digital, marca Planix 7, para el cálculo de superficies sobre láminas de acetato donde se había hecho la transferencia de las áreas de los diferentes tipos de tejidos observados en micrografías de la sección transversal de cada individuo estudiado.

Para la segunda metodología, se utilizaron fotomicrografías, a las cuales se aplicó un pre-procesamiento que consistió en la aplicación de una técnica de ajuste lineal de constraste a cada banda RGB y con estas bandas se realizó posteriormente una composición a color verdadero (Jensen, 2005; Chuvieco, 2008; Mather y Koch 2011), todo ello con el fin de mejorar la visualización de la imagen y luego realizar la interpretación visual en pantalla (Pacheco *et al*., 2007) de las fotomicrografías, en las cuales se delineó y etiquetó los elementos estructurales.

Para la tercera metodología, se empleó procesamiento digital de las fotomicrografías que implicó tres pasos: El primero involucra la segmentación de imágenes que es una técnica de agrupación de datos, en el que sólo las áreas espacialmente adyacentes pueden contenerse, este proceso de segmentación identifica cada "píxel" como un área diferente

CUADRO 1. Especies estudiadas: Nombre científico, familia, nombre común, número de muestra en Xiloteca MERw.

NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA	NOMBRE COMÚN	Nº MUESTRA
Hymenaea courbaril L.	Fabaceae	Algarrobo	X5589, X5590
*Erisma uncinatum*Warm.	Vochysiaceae	Mureillo	X203, X4556
Gmelina arborea Roxb. ex Sm.	Lamiaceae	Melina	X6427-1b, X6427-1c
Pachira quinata (Jacq.) W.S. Alverson	Malvaceae	Saqui-saqui	X4521, X4990

(Shimabukuro *et al*., 1997). El segundo la clasificación no supervisada, (Richards, 1999; Lillesand y Kiefer, 2000; Jensen, 2005; Chuvieco, 2008; Mather y Koch, 2011) plantea que se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen, asimismo, no implica ningún conocimiento del objeto de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados. Ormeño (2006) añade que los pixeles de las áreas de entrenamiento se someten a un algoritmo de clustering para determinar el agrupamiento "natural" de los mismos. Se supone, entonces, que cada cluster representa a una clase y que la asignación de denominaciones a las distintas clases puede hacerse en esta fase de clustering o tras la conclusión de la fase de asignación de la totalidad de la imagen. El clasificador ISOSEG (Bins *et al*., 1993) citado en Shimabukuro *et al*. (1997) es el algoritmo que se utilizó en SPRING para clasificar áreas de las fotomicrografías, y el cual trabaja únicamente sobre un conjunto de regiones resultantes de una segmentación, igualmente es un algoritmo de agrupamiento de datos no-dirigido, aplicado en un conjunto de áreas que son caracterizados a su vez, por sus atributos estadísticos de media y covarianza.

El tercer y último paso incluye la matriz de confusión, en este punto Fallas (2002) indica que para evaluar la exactitud de una clasificación es necesario, utilizar una fuente de información de mayor exactitud que el material a evaluar. Chuvieco (2008) y Congalton y Green (2009) mencionan que la matriz de confusión muestra en su diagonal las categorías clasificadas correctamente; en las columnas las categorías deducidas por el autor de la clasificación y en las filas las clases de referencia (verdad de terreno). El error asociado a cada una de las columnas se denomina error de inclusión o comisión y representa aquellas áreas que fueron asignadas a dicha categoría sin pertenecer a ella. En las filas se presentan las categorías verdaderas; el error asociado a cada fila se denomina error de exclusión u omisión y representa aquellas áreas que no fueron asignadas a dicha categoría aun cuando pertenecían a ella (Fallas, 2002). La proporción de puntos correctamente asignados (diagonal) expresa la confiabilidad del proceso. Tanto para la segunda como

para la tercera metodología se emplearon los software de SPDI y de SIG:

- SPRING, versión 5.2.5: fue el principal software empleado en el estudio, es de dominio público y fue diseñado para trabajar proyectos de SIG y al mismo tiempo para trabajar con el tratamiento de imágenes obtenidas mediante percepción remota que realiza la integración en un único ambiente de las representaciones de datos matriciales "estructura ráster" y datos con estructura vectorial (Espejo y Ramírez, 2013). Se utilizó para el pre-procesamiento (mejoras y realces), segmentación, clasificación y mapeo de clases en las fotomicrografías para determinar proporciones. También se usó para las mediciones lineales de los elementos anatómicos.
- ENVI, versión 5.0: software para la visualización, análisis y presentación de imágenes geoespaciales digitales. También es una herramienta para el procesamiento de imagen espectral y la tecnología de análisis de imágenes accesibles a través de diversos dispositivos (EXELIS, 2012). Se utilizó para el procesamiento digital de las fotomicrografías y validación a través de las matrices de confusión para determinar proporciones del tejido anatómico.
- ArcGIS, versión 9.3: conjunto de productos de software de SIG producido y comercializado por Environmental Systems Research Institute (ESRI, 2010). Posee un conjunto de aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica (Barbosa, 2014). Se utilizó en interpretación digital de las fotomicrografías para determinar proporciones.

Una vez realizado el proceso de medición bajo las tres metodologías considerando los criterios establecidos por IAWA Committee (1989), para cada característica cuantificada en las mediciones lineales se determinaron su estadística básica (media, desviación típica, valores máximos y mínimos, coeficiente de variación) a través del uso del paquete estadístico SPSS 22.0 bajo Windows. Asimismo, se tomó el tiempo empleado para realizar cada una de las mediciones. Posteriormente se realizó un Análisis de la Varianza (ANOVA) simple con las siguientes hipótesis:

- H_0: las medias obtenidas por el método directo y el método indirecto son estadísticamente iguales.
- H_1: por lo menos una de las medias entre método directo e indirecto es estadísticamente diferente.

En el caso de rechazar la hipótesis nula (H_0) se aplicó un análisis Post-Hoc de prueba de diferencia de medias (prueba de Tukey (α = 0,01) para determinar dónde se estaban presentando diferencias significativas entre los resultados obtenidos con la medición directa y los métodos que utilizan software. En el caso de determinación de proporciones, la validación estadística se realizó mediante el cálculo de una matriz de confusión que permitió determinar errores de confusión, omisión y la precisión global. De igual manera, se obtuvo el estadístico K (Cohen, 1960) para medir la precisión o acuerdo basado en la diferencia entre el error de la matriz y acuerdo en los cambios (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins 1986), mediante la siguiente ecuación:

$$\widehat{K} = \frac{n\sum_{i=1.n} X_{ii} - \sum_{i=i.n} X_{i+}X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=i.n} X_{i+}X_{+i}} \quad (1)$$

donde:
K = Indice kappa;
n = número total de casos;
X_{ij} se refiere al acuerdo observado
y X_{i+} y X_{+i} son los marginales de cada categoría.

Una vez obtenidos los datos de refencia, se estimó el error medio cuadrático (REMC) (Congalton y Green, 2009), para calcular un error de diferencias entre los métodos utilizados en la determinación de proporciones del tejido leñoso:

$$REMCT = \sqrt{(REMCsa)^2 + (REMCivp)^2} \quad (2)$$

donde:
REMCT = error medio cuadrático total;
REMCsa = error medio cuadrático para el método semi-automático y el
REMCivp= error medio cuadrático para la interpretación visual en pantalla.

Para efecto de esta investigación solo se determinó el error medio cuadrático para las mediciones semi-automáticas y el error para la interpretación visual en pantalla:

$$REMCsa = \sqrt{\sum Esa^2/n} \quad (3)$$

donde:
REMCsa = error medio cuadrático para el método semi-automático;
$\sum Esa$ = sumatoria del error para el método semi-automático por clase y
n= número de clases.

$$REMCivp = \sqrt{\sum Eivp^2/n} \quad (4)$$

donde:
REMCvpi = error medio cuadrático para la interpretación visual en pantalla;
$\sum Evpi$ = sumatoria del error para la interpretación visual en pantalla por clase y
n = el número de clases.

Para finalizar, el proceso en el cual se determinaron las proporciones de tejidos en la madera se realizó la siguiente transformación: el área de cada una de las clases para los procesos con software, la interpretación visual en pantalla y el proceso semi-automático se obtuvo en pixeles y fue necesario transformar los resultados de las proporciones a porcentaje (%):

$$\text{PEA} = \frac{ATp}{AEp} * 100\% \quad (5)$$

donde:
PEA = Proporción de Elementos Anatómicos;
ATp = Área Total en pixeles y AEp = Área de Elementos en pixeles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MEDICIONES LINEALES EN SECCIÓN TRANSVERSAL, TANGENCIAL Y TEJIDO MACERADO

Para las cuatro especies estudiadas ***[CUADROS 2, 3, 4, 5, 6]*** se observó que los dos métodos de medición (directo y digital) arrojan resultados similares al no presentarse diferencias estadísticamente significativas de acuerdo al análisis de varianza y la realización de la prueba de Tukey (α = 0,01) en los casos en que se rechazara la hipótesis nula. En estos casos

CUADRO 2. Mediciones de diámetro de poros, frecuencia de poros, diámetro de punteaduras, longitud de elementos de los
y método directo (Mínimo, Media, Desviación típica, Máximo, Número de mediciones y Coeficiente de variación).

		Hymenaea
Caracter	**Método directo (X5589)**	**Método digital (X5589)**
Diámetro de poros (µm)	(140-) 166,6 ± 19,24 (-215) n = 25; CV = 11,54%	(127,3-) 165,86 ± 24,77 (-220,6) n = 25
Poros/mm²	(3-) 4 ± 0,84 (-5) n = 5; CV = 21 %	(1,96-) 3,44 ± 0,48 (-4,04) n = 5; CV
Diámetro de punteaduras (µm)	(5-) 6 ± 1,74 (-10) n = 10; CV = 29%	(6,09-) 6,95 ± 0,47 (-7,75) n = 10; C
LEV (µm)	(160-) 298,4 ± 67,12 (-425) n = 25; CV = 22,49%	(129,37-) 267,62 ± 95,89 (-542,9) n = 25
Longitud de Fibras (µm)	(940-) 1419,6 ± 189,63 (-1800) n = 25; CV = 13,36%	(906,27-) 1350,17 ± 283,23 (-1900,1) n =
GPF (µm)	(1,25-) 3,30 ± 0,98 (-5,63) n = 25; CV = 29,69%	(1,77-) 3,25 ± 0,77 (-4,62) n = 25; CV
Altura de radios (µm)	(310-) 394 ± 58,02 (-540) n = 25; CV = 14,72%	(335,43-) 398,49 ± 43,85 (-476,55) n =
Radios/mm	(5-) 7 ± 1,41(-9) n = 10; CV = 29%	(5-) 6,2 ± 0,92 (-8) n = 10; CV =
		Erisma u
Caracter	**Método directo (X203)**	**Método digital (X203)**
Diámetro de poros (µm)	(170-) 243,2 ± 24,44 (-280) n = 25; CV = 10,04%	(94-) 241,84 ± 42,45 (-298) n = 25;
Poros/mm²	(2-) 3,12 ± 0,91 (-4,4) n = 5; CV = 29,16%	(1,89-) 2,58 ± 0,69 (-3,5) n = 5; CV
Diámetro de punteaduras (µm)	(7,5-) 10,25 ± 1,64 (-12,5) n = 10; CV = 16%	(7,82-) 9,52 ± 1,24 (-11,36) n = 10;
LEV (µm)	(120-) 347,2 ± 157,41 (-780) n = 25; CV = 45,33%	(250-) 424,33 ± 123,97 (-809,33) n = 2
Longitud de Fibras (µm)	(1040-) 1313,2 ± 182,47 (-1700) n = 25; CV = 13,89%	(742,53-) 1314,08 ± 195,13 (-1711,89) n
GPF (µm)	(2,5-) 4,02 ± 1,27 (-7,5) n = 25; CV = 31,59%	(2,1-) 3,89 ± 1,06 (-6,02) n = 25; C
Altura de radios (µm)	(430-) 498,4 ± 56,13 (-645) n = 25; CV = 32,15%	(410,84-) 536,84 ± 75,86 (-679,75) n =
Radios/mm	(6-) 9,9 ± 2,68 (-15) n = 10; CV = 27,07%	(7-) 9 ± 1,24 (-11) n = 10; CV =
		Gmelina
Caracter	**Método directo (X6427-1b)**	**Método digital (X6427-1b**
Diámetro de poros (µm)	(60-) 88,4 ± 18,18 (-120) n = 25; CV = 20,56%	(53,58-) 88,25 ± 19,05 (-131,29) n = 25
Poros/mm²	(3,2-) 4,16 ± 1,71 (-7,2) n = 5; CV = 41,10 %	(2,16-) 3,07 ± 0,79 (-4,31) n = 5; CV
Diámetro de punteaduras (µm)	(10-) 11,75 ± 1,05 (-12,5) n = 10; CV = 8,93%	(10,7-) 11,31 ± 0,49 (-12,02) n = 10;
LEV (µm)	(140-) 287,4 ± 98,38 (-540) n = 25; CV = 34,23%	(121,01-) 248,69 ± 83,37 (-409,74) n = 1
Longitud de Fibras (µm)	(900-) 1098,8 ± 203,48 (-1980) n = 25; CV = 18,51%	(736,87-) 1128,9 ± 288,24 (-1567,7) n = 1
GPF (µm)	(1,25-) 2,65 ± 0,88 (-4,38) n = 25; CV = 33,20%	(0,08-) 2,37 ± 0,94 (-4,29) n = 25; CV
Altura de radios (µm)	(220-) 434 ± 67,94 (-550) n = 25; CV = 15,65%	(290,5-) 399,44 ± 52,21 (-502,36) n = 2
Radios/mm	(5-) 7,1 ± 1,66 (-10) n = 10; CV = 23,38%	(6-) 7 ± 0,81 (-8) n = 10; CV = 1
		Pachira
Caracter	**Método directo (X4521)**	**Método digital (X4521)**
Diámetro de poros (µm)	(170-) 243,2 ± 24,44 (-280) n = 25; CV = 10,04%	(205,65-) 258,95 ± 27,56 (-303,99) n = 2
Poros/mm²	(2-) 2,48 ± 0,86 (-4) n = 5; CV = 34,67 %	(1,35-) 2,05 ± 0,40 (-2,43) n = 5; CV
Diámetro de punteaduras (µm)	(10-) 12,5 ± 2,04 (-15) n = 10; CV = 16,32%	(11,32-) 13,75 ± 1,05 (-14,79) n = 10;
LEV (µm)	(295-) 380 ± 51,33 (-520) n = 25; CV = 13,50%	(303,9-) 340,32 ± 32,73 (-406,87) n = 1
Longitud de Fibras (µm)	(1500-) 2048,4 ± 281,14 (-2555) n = 25; CV = 13,72%	(1712,8-) 1929,36 ± 164,60 (-2382) n =
GPF (µm)	(1,88-) 4,20 ± 2,79 (-16,25) n = 25; CV = 66,42%	(2,5-) 4,36 ± 1,04 (-6,82) n = 25; CV
Altura de radios (µm)	(400-) 708 ± 161,55 (-1080) n = 25; CV = 22,81%	(337,07-) 648,27 ± 208,10 (-1143,48) n =
Radios/mm	(5-) 6,5 ± 0,97 (-8) n = 10; CV = 14,92%	(5-) 6,3 ± 0,82 (-7) n = 10; CV =

vasos (LEV), longitud de fibras (LF), grosor de paredes de las fibras (GPF), altura de radios y radios/mm. Método tradicional

n courbaril		
	Método directo (X5590)	**Método digital (X5590)**
; CV = 14,93%	(140-) 160,8 ± 16,11 (-190) n = 25; CV = 10,01%	(123,54-) 164,91 ± 20,51 (-227,92) n = 25; CV = 12,43%
= 13,95%	(3,20-) 3,68 ± 0,86 (-5,20) n = 5; CV = 23,36%	(2,70-) 3,02 ± 0,22 (-3,23) n = 5; CV = 0,07%
V = 6,76%	(5-) 6,25 ± 1,31 (-7,50) n = 10; CV = 20,96%	(5,85-) 7,42 ± 1,06 (-9,49) n = 10; CV = 14,28%
; CV = 35,83%	(105-) 289,8 ± 105,65 (-480) n = 25; CV = 36,45%	(132,65-) 305,01 ± 95,59 (-477,61) n = 12; CV = 31,33%
23; CV = 20,97%	(1150-) 1577,8 ± 264,66 (2025) n = 25; CV = 16,77%	(1023,75-) 1491,41 ± 226,63 (-1901,5) n = 23; CV = 15,19%
V = 23,69%	(1,88-) 3,95 ± 1,27 (-6,25) n = 25; CV = 32,15%	(1,84-) 4,04 ± 1,35 (-6,40) n = 25; CV = 33,41%
23; CV = 11%	(370-) 532 ± 71,47 (-650) n = 25; CV = 13,43%	(394,14-) 575,15 ± 107,71 (-793,12) n = 23; CV = 18,72%
6,76%	(5-) 6,8 ± 0,92 (-8) n = 10; CV = 20,96%	(5-) 6,2 ± 0,78 (-8) n = 10; CV = 14,28%
ncinatum		
	Método directo (X4556)	**Método digital (X4556)**
CV = 17,55%	(175-) 209,8 ± 19,55 (-250) n = 25; CV = 9,31%	(172-) 211,12 ± 19,28 (-253) n = 25; CV = 9,13%
/ = 26,74%	(1,2-) 1,44 ± 0,35 (-2) n = 5; CV = 24,30 %	(1,08-) 1,45 ± 0,30 (-1,89) n = 5; CV = 20,68%
CV = 13,02%	(7,5-) 9,12 ± 1,18 (-11,25) n = 10; CV = 12,9%	(8,53-) 9,89 ± 1,10 (-12,42) n = 10; CV = 11,12%
25; CV = 29,21%	(230-) 420,65 ± 122,88 (-700) n = 25; CV = 29,21%	(334,37-) 506,47 ± 99,69 (-648,21) n = 14; CV = 19,68%
= 25; CV = 14,84%	(1190-) 1510,8 ± 174,5 (-1800) n = 25; CV = 11,55%	(1314,2-) 1608,62 ± 233,40 (-2184,06) n = 17; CV = 14,50%
V = 27,24%	(1,25-) 3,75 ± 1,14 (-6,25) n = 25; CV = 30,4%	(1,72-) 4,47 ± 1,57 (-8,29) n = 25; CV = 35,12%
23; CV = 14,13%	(350-) 459,4 ± 57,12 (-590) n = 25; CV = 12,43%	(139,51-) 439,59 ± 86,95 (-549,28) n = 23; CV = 19,77%
13,77%	(8-) 10,2 ± 1,68 (-14) n = 10; CV = 16,47%	(7-) 8,9 ± 1,72 (-12) n = 10; CV = 19,32%
arborea		
)	**Método directo (X6427-1c)**	**Método digital (X6427-1c)**
; CV = 21,58%	(60-) 95,2 ± 16,61 (-120) n = 25; CV = 18,01%	(76,55-) 107,24 ± 21,33 (-155,37) n = 25; CV = 19,88%
/ = 25,73%	(3,6-) 7,04 ± 2,12 (-8,8) n = 5; CV = 30,11%	(4,85-) 6,52 ± 1,38 (-8,09) n = 5; CV = 21,16%
CV = 4,33%	(10-) 11,87 ± 1,47 (-15) n = 10; CV = 12,38%	(9,78-) 11,20 ± 1,16 (-13,11) n = 10; CV = 10,35%
1; CV = 33,52%	(145-) 298,2 ± 94,18 (-500) n = 25; CV = 31,58%	(147,38-) 256,15 ± 72,19 (-446,56) n = 25; CV = 28,18%
4; CV = 25,53%	(1070-) 1301,2 ± 221,97 (-2015) n = 25; CV = 17,05%	(924,49-) 1173,36 ± 137,66 (-1405,98) n = 25; CV = 11,73%
V = 39,66%	(0,63-) 2,55 ± 1,24 (-4,38) n = 25; CV = 48,62%	(0,36-) 1,82 ± 0,87 (-3,31) n = 25; CV = 47,80%
3; CV = 13,07%	(300-) 382 ± 50,74 (-470) n = 25; CV = 13,28%	(316,5-) 395,49 ± 61,33 (-574,3) n = 23; CV = 15,50%
1,57%	(4-) 6,1 ± 0,87 (-7) n = 10; CV = 14,26%	(4-) 5,3 ± 0,94 (-7) n = 10; CV = 17,73%
quinata		
	Método directo (X4990)	**Método digital (X4990)**
5; CV = 10,64%	(240-) 302,8 ± 24,75 (-340) n = 25; CV = 8,17%	(236,33-) 317,82 ± 33,43 (-365,74) n = 25; CV = 10,51%
/ = 19,51%	(1,2-) 1,68 ± 0,43 (-2,4) n = 5; CV = 25,59%	(1,08-) 2,26 ± 0,72 (-2,96) n = 5; CV = 31,85%
CV = 7,63%	(12,5-) 15,87 ± 1,67 (-17,5) n = 10; CV = 10,52%	(11,92-) 14,22 ± 1,04 (-15,73) n = 10; CV = 7,31%
8; CV = 9,61%	(140-) 330 ± 66,86 (-425) n = 25; CV = 20,26%	(269,87-) 354,24 ± 61,51 (-460,27) n = 9; CV = 17,36%
24; CV = 8,53%	(1055-) 1746,6 ± 288,2 (-2420) n = 25; CV = 16,50%	(1302,05) 1924,8 ± 362,68 (-2510,8) n = 25; CV = 18,84%
/ = 23,85%	(1,88-) 3,42 ± 1,06 (-6,25) n = 25; CV = 30,99%	(1,55-) 3,81 ± 1,55 (-7,12) n = 25; CV = 40,68%
25; CV = 32,10%	(420-) 722,8 ± 158,88 (-1010) n = 25; CV = 21,98%	(422,77-) 685,42 ± 147,88 (-992,93) n = 25; CV = 21,57%
13,01%	(5-) 5,5 ± 0,70 (-7) n = 10; CV = 12,72%	(5-) 6,2 ± 0,91 (-7) n = 10; CV = 14,67%

CUADRO 3. *Hymenaea courbaril.* Análisis de varianza (ANOVA) para diámetro de poros, frecuencia de poros, diámetro de punte vasos (LEV), longitud de fibras (LF), grosor de paredes de las fibras (GPF), altura de radios y radios/mm. H_0: las medias obten de software son estadísticamente similares. H_1: por lo menos una de las medias obtenidas por método directo y el uso de softv

		DIÁMETRO DE POROS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	502,897	3	167,632	0,403
Dentro de Grupos	39957,356	96	416,222	
Total	40460,253	99		
		FRECUENCIA DE POROS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	2,573	3	0,858	1,955
Dentro de Grupos	7,019	16	0,439	
Total	9,591	19		
		DIÁMETRO DE PUNTEADURAS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	12,747	3	4,249	2,766
Dentro de Grupos	55,308	36	1,536	
Total	68,054	39		
		LONGITUD DE ELEMENTOS DE LOS VASOS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	16639,601	3	5546,534	0,66
Dentro de Grupos	697297,185	83	8401,171	
Total	713936,787	86		
		LONGITUD DE FIBRAS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	687667,742	3	229222,581	3,877
Dentro de Grupos	5439094,088	92	59120,588	
Total	6126761,83	95		
		GROSOR DE PAREDES DE FIBRAS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	13,012	3	4,337	3,482
Dentro de Grupos	119,592	96	1,246	
Total	132,604	99		
		ALTURA DE RADIOS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	642315,514	3	214105,171	38,927
Dentro de Grupos	528010,083	96	5500,105	
Total	1170325,596	99		
		FRECUENCIA DE RADIOS		
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	5,1	3	1,7	1,577
Dentro de Grupos	38,8	36	1,078	
Total	43,9	39		

** Diferencias significativas

eaduras, longitud de elementos de los idas con la medición directa y el uso ware es estadísticamente diferente.

Significancia
0,751

Significancia
0,162

Significancia
0,056

Significancia
0,579

Significancia
0,012**

Significancia
0,019

Significancia
0,00**

Significancia
0,212

[CUADRO 1], se formaron dos grupos que mostraban diferencias entre los individuos de la especie estudiada, pero al comparar dentro de cada individuo los resultados arrojados por el método directo y digital, no se presentaron diferencias entre los mismos. Esto coincide con lo encontrado por Rosero *et al.* (2011) quienes utilizando el software Image Tool v3.0, aplicaron un análisis digital de imágenes en variables anatómicas como diámetro y frecuencia de los vasos, altura y ancho de radios, diámetro y espesor de pared de fibra y no encontraron diferencias entre las mediciones realizadas con el software indicado y las mediciones directas. Calderón (2010) encontró resultados similares trabajando con *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. Al incorporar un mayor número de especies el presente trabajo se ratifica la validez del TIG como herramienta en la determinación de las características dimensionales en elementos xilemáticos en especies con notable diferencia en cuanto a estructura anatómica.

El tiempo de medición, en unidades absolutas, implementado fue mayor para casi todos los elementos cuantificados por especie utilizando el método directo *[CUADRO 8; FIGURA 11]*. El contraste más alto entre el tiempo empleado para los dos métodos se evidencia con las mediciones de los tejidos macerados, en los cuales el tiempo invertido para realizar sus mediciones lineales es hasta cuatro veces mayor con el método directo. Esta diferencia de tiempo radica, por ejemplo, en la búsqueda de elementos vasculares o fibras en la lámina del microscopio, en estimar las mediciones con la regla del microscopio cuando la fibra presenta extremos con curvaturas o cuando estas son más largas que la longitud de la

CUADRO 4. *Erisma uncinatum.* Análisis de varianza (ANOVA) para diámetro de poros, frecuencia de poros, diámetro de puntea vasos (LEV), longitud de fibras (LF), grosor de paredes de las fibras (GPF), altura de radios y radios/mm. H_0: las medias obten de software son estadísticamente similares. H_1: por lo menos una de las medias obtenidas por método directo y el uso de softw

DIÁMETRO DE POROS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	25740,99	3	8530,33	10,882
Dentro de Grupos	75694,00	96	788,479	
Total	101434,99	99		
FRECUENCIA DE POROS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	10,578	3	3,526	9,135
Dentro de Grupos	6,176	16	0,386	
Total	16,755	19		
DIÁMETRO DE PUNTEADURAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	7,014	3	2,338	1,358
Dentro de Grupos	61,989	36	1,722	
Total	69,003	39		
LONGITUD DE ELEMENTOS DE LOS VASOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	235018,279	3	78339,426	4,576
Dentro de Grupos	1455177,492	85	17119,735	
Total	1690195,771	88		
LONGITUD DE FIBRAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	1376279,944	3	458759,981	12,174
Dentro de Grupos	3316188,993	88	37683,966	
Total	4692468,937	91		
GROSOR DE PAREDES DE FIBRAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	7,342	3	2,447	1,494
Dentro de Grupos	157,3	96	1,639	
Total	164,643	99		
ALTURA DE RADIOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	139402,485	3	46467,495	9,42
Dentro de Grupos	473544,147	96	4932,752	
Total	612946,632	99		
FRECUENCIA DE RADIOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	12,6	3	4,2	1,151
Dentro de Grupos	131,4	36	3,65	
Total	144,0	39		

** Diferencias significativas

aduras, longitud de elementos de los
idas con la medición directa y el uso
ware es estadísticamente diferente.

Significancia
0,00**
Significancia
0,01*
Significancia
0,271
Significancia
0,005**
Significancia
0,000**
Significancia
0,221
Significancia
0,00**
Significancia
0,342

reglilla del objetivo y en la búsqueda de las fibras con mejores características, así como también en el cansancio visual que produce medir el grosor de las paredes de las fibras con el objetivo 40X.

Las TIG brindan una interfaz mucho más cómoda a la hora de realizar mediciones, además de herramientas capacitadas para adaptar las características de los elementos anatómicos a las mediciones a realizar, como el caso de la digitalización de las fibras para calcular la longitud de estas. Por lo tanto, las TIG brindan la oportunidad de automatizar un proceso de medición que actualmente genera cansancio y poca rentabilidad desde el punto de vista del tiempo aplicado.

ESTUDIO DE PROPORCIONES DE TEJIDO LEÑOSO

En las **FIGURAS 1-4** se presentan las imágenes correspondientes a un individuo de cada una de las especies estudiadas, partiendo desde la micrografía inicial hasta los diferentes procesamientos aplicados para la determinación de proporciones. Los resultados obtenidos en la cuantificación de la proporción de poros, parénquima, radios y fibras **[FIGURAS 5, 6]** indican que se encontraron diferencias entre la metodología semiautomática y la medición directa (planímetro). Específicamente, las diferencias se manifestaron en la proporción de fibras, parénquima axial y radial. Esto coincide con lo reportado por Herrera *et al.* (2002). Al igual que lo encontrado por Calderon (2010), el método manual y la interpretación visual en pantalla se comportaron de manera similar.

Los mayores tiempos de medición correspondieron a la metodología manual **[FIGURA 7]**. El tiempo total de este método

CUADRO 5. *Gmelina arborea.* Análisis de varianza (ANOVA) para diámetro de poros, frecuencia de poros, diámetro de puntea vasos (LEV), longitud de fibras (LF), grosor de paredes de las fibras (GPF), altura de radios y radios/mm. H_0: las medias obten de software son estadísticamente similares. H_1: por lo menos una de las medias obtenidas por método directo y el uso de soft

DIÁMETRO DE POROS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	5968,204	3	1989,401	5,584
Dentro de Grupos	34202,516	96	356,276	
Total	40170,719	99		
FRECUENCIA DE POROS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	53,743	3	17,914	7,165
Dentro de Grupos	40,004	16	2,5	
Total	93,747	19		
DIÁMETRO DE PUNTEADURAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	3,182	3	1,061	0,867
Dentro de Grupos	44,053	36	1,224	
Total	47,235	39		
LONGITUD DE ELEMENTOS DE LOS VASOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	33592,444	3	11197,481	1,435
Dentro de Grupos	639806,767	82	7802,522	
Total	673399,212	85		
LONGITUD DE FIBRAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	569568,328	3	189856,109	4,348
Dentro de Grupos	3711229,460	85	43661,523	
Total	4280797,788	88		
GROSOR DE PAREDES DE FIBRAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	10,249	3	3,416	3,501
Dentro de Grupos	96,424	96	1,004	
Total	106,673	99		
ALTURA DE RADIOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	36767,238	3	12255,746	3,584
Dentro de Grupos	328324,252	96	3420,044	
Total	365091,49	99		
FRECUENCIA DE RADIOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	21,475	3	7,158	5,614
Dentro de Grupos	45,9	36	1,275	
Total	67,375	39		

** Diferencias significativas

aduras, longitud de elementos de los nidas con la medición directa y el uso tware es estadísticamente diferente.

Significancia
0,01*

Significancia
0,03

Significancia
0,467

Significancia
0,239

Significancia
0,007

Significancia
0,021

Significancia
0,017

Significancia
0,003*

corresponde a las siguientes etapas: copiado de la imagen original en una lámina de acetato y las tres mediciones efectuadas por cada elemento estudiado (poros, parénquima, radios y fibras). Es importante mencionar que también se debe considerar en esta estimación de tiempo, aunque no esté cuantificado, el revelado de las imágenes y el manejo del planímetro digital lo que genera, además del tiempo, cansancio y costos adicionales. El menor tiempo de medición correspondió al método semi-automático *[FIGURA 7]* ya que se vale de un SPDI que emplea algoritmos de clasificación como el ISOSEG reduciendo de manera significativa el proceso de asignación de áreas de tejido leñoso en las muestras de madera. Este método es rentable desde el punto de vista de automatización de un proceso, pero su precisión en los resultados es desfavorable. La interpretación digital también logró valores de tiempo menores a los obtenidos por la técnica manual.

La muestra *Gmelina arborea* (X6427-1b) fue la que mostró mayor tiempo de medición en la metodología manual y en el proceso semi-automático, esto debido a la estructura anatómica que presenta, en especial por la cantidad de poros y radios anchos, lo que genera un tiempo adicional con respecto a las mediciones de las otras muestra utilizando el planímetro. Las muestras de *Pachira quinata* presentaron los valores de tiempo más altos en la interpretación digital, no obstante fueron menores que el tiempo empleado para la metodología tradicional. Las características anatómicas de *Pachira quinata* son difíciles de interpretar, específicamente cuando se trata de diferenciar las fibras de paredes delgadas

CUADRO 6. *Pachira quinata*. Análisis de varianza (ANOVA) para diámetro de poros, frecuencia de poros, diámetro de puntea
vasos (LEV), longitud de fibras (LF), grosor de paredes de las fibras (GPF), altura de radios y radios/mm. H_0: las medias obten
de software son estadísticamente similares. H_1: por lo menos una de las medias obtenidas por método directo y el uso de sof

DIÁMETRO DE POROS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	93642,679	3	31214,226	40,434
Dentro de Grupos	74110,068	96	771,98	
Total	167752,746	99		
FRECUENCIA DE POROS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	1,746	3	0,582	1,419
Dentro de Grupos	6,561	16	0,410	
Total	8,307	19		
DIÁMETRO DE PUNTEADURAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	58,487	3	19,496	8,503
Dentro de Grupos	82,543	36	2,293	
Total	141,029	39		
LONGITUD DE ELEMENTOS DE LOS VASOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	34179,226	3	11393,075	3,797
Dentro de Grupos	219040,691	73	3000,557	
Total	253219,916	76		
LONGITUD DE FIBRAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	1160384,661	3	386794,887	4,79
Dentro de Grupos	7671370,018	95	80751,263	
Total	8831754,679	98		
GROSOR DE PAREDES DE FIBRAS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	13,187	3	4,396	1,411
Dentro de Grupos	299,031	96	3,115	
Total	312,281	99		
ALTURA DE RADIOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	78920,893	3	26306,964	0,903
Dentro de Grupos	2796587,483	9699	29131,12	
Total	2875508,376			
FRECUENCIA DE RADIOS				
Fuente de variación	**Suma de Cuadrados**	**Grados de libertad**	**Cuadrado Medio**	**F**
Entre grupos	5,675	3	1,892	2,551
Dentro de Grupos	26,7	36	0,742	
Total	32,375	39		

** Diferencias significativas

aduras, longitud de elementos de los nidas con la medición directa y el uso tware es estadísticamente diferente.

	Significancia
	0,00*

	Significancia
	0,274

	Significancia
	0,00*

	Significancia
	0,014

	Significancia
	0,004

	Significancia
	0,244

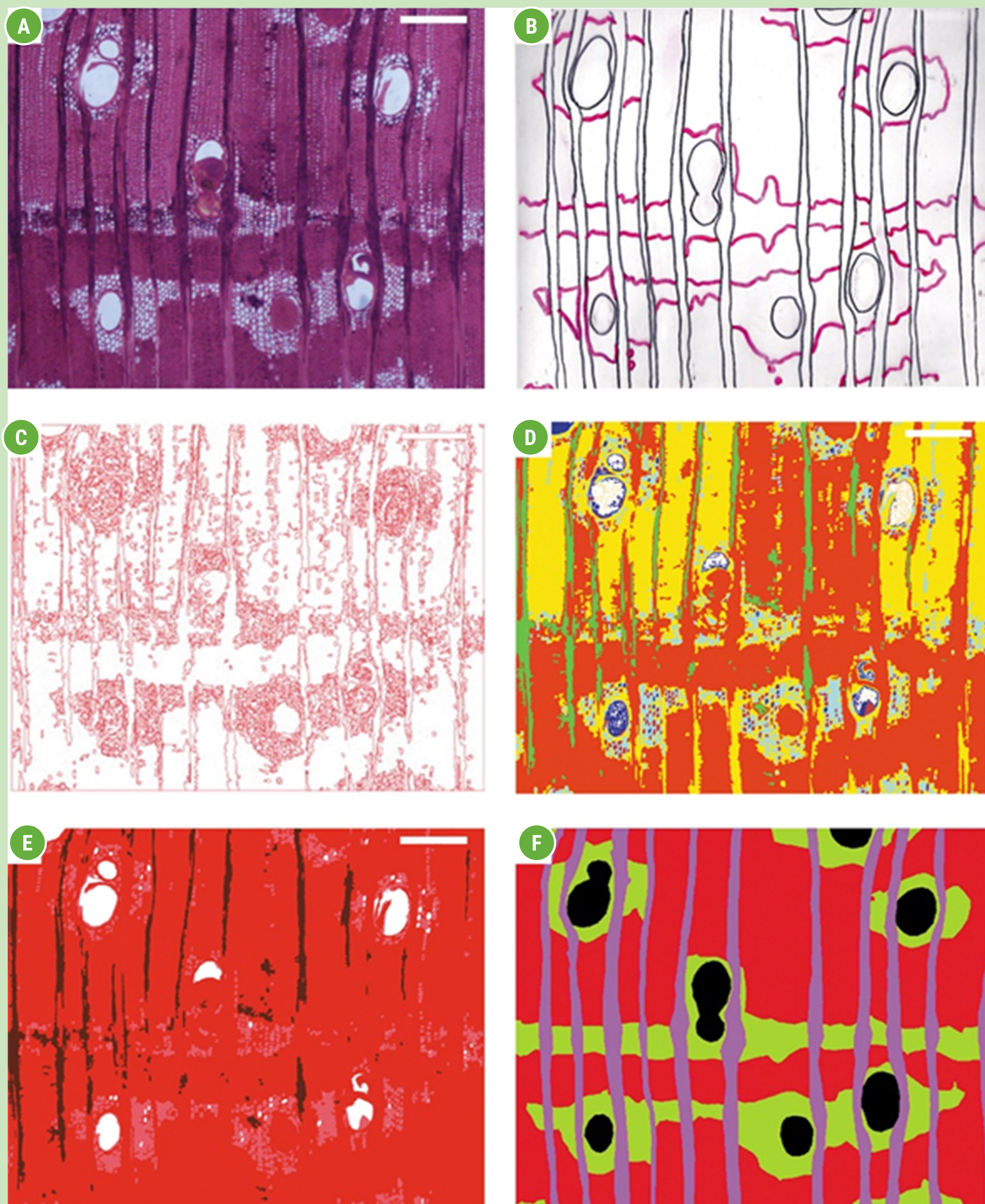
	Significancia
	0,443

	Significancia
	0,071

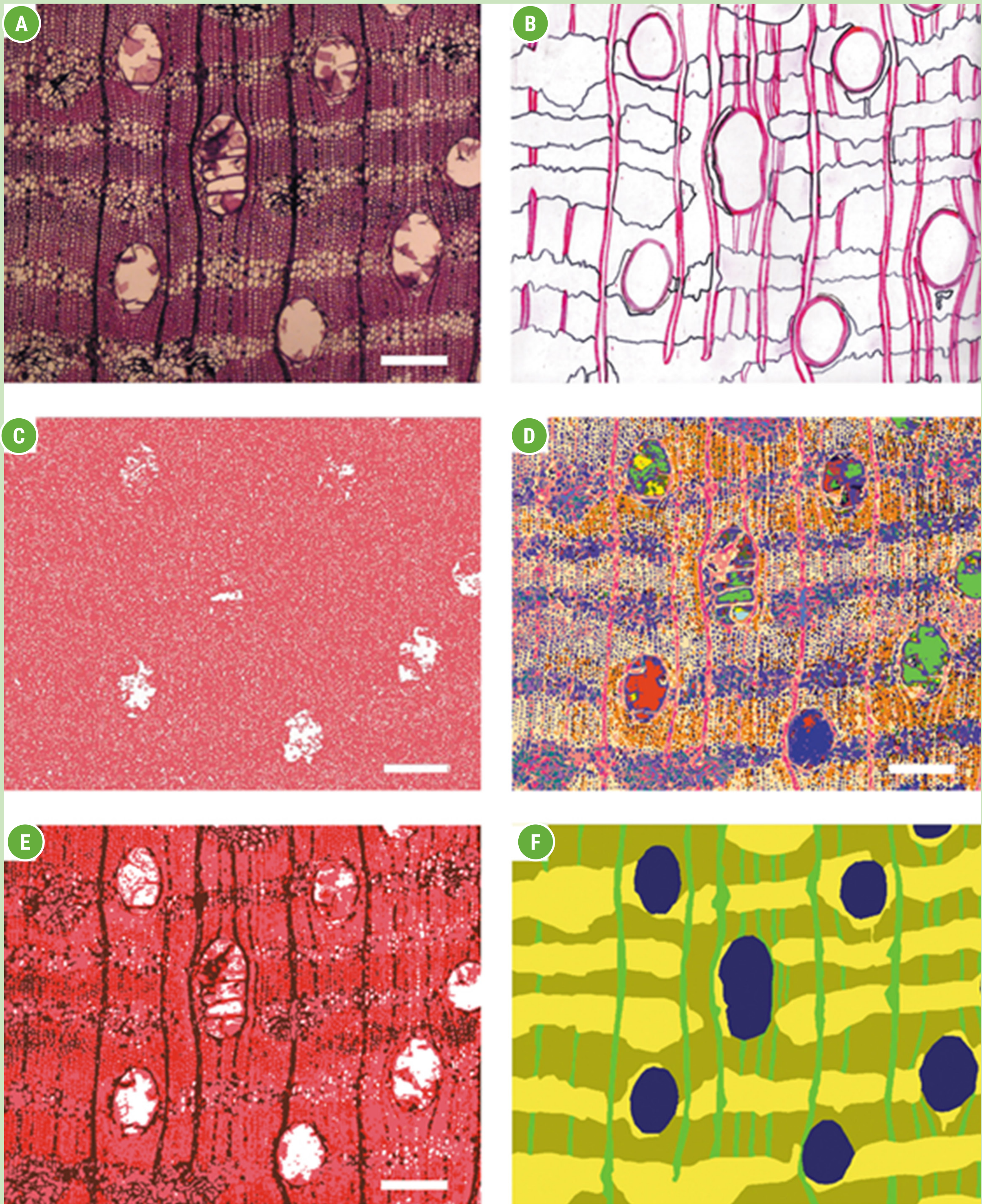
de un parénquima apotraqueal difuso en agregado; de ahí el tiempo para determinar proporciones de estos tejidos en esta especie, sin embargo los tiempos de medición utilizando SIG agilizan el proceso de manera eficaz.

Espinosa *et al*. (2015) señalan que la captura de fotomicrografías está expuesta a factores que contaminan con ruido la imagen digital resultante, por lo tanto el factor que está ligado a las variaciones de iluminación presentes sobre la muestra genera sobre la imagen un cambio de intensidades que distorsiona la información y estas podrían influir en el desempeño de los métodos de segmentación, por ello la importancia de aplicar algunas técnicas de pre-procesamiento a las imágenes. Esto coincide con lo encontrado en el presente estudio ya que la fiabilidad de los resultados dependió de distintas variables que se debieron tener en cuenta a la hora de valorar los errores estimados en el proceso de verificación, estas son las características del sensor (cámara acoplada al microscopio) que influyó de manera significativa en la información espectral que presentaron cada uno de los elementos estudiados por especie y el tipo de clasificador que se escogió para obtener las proporciones de los componentes anatómicos de madera.

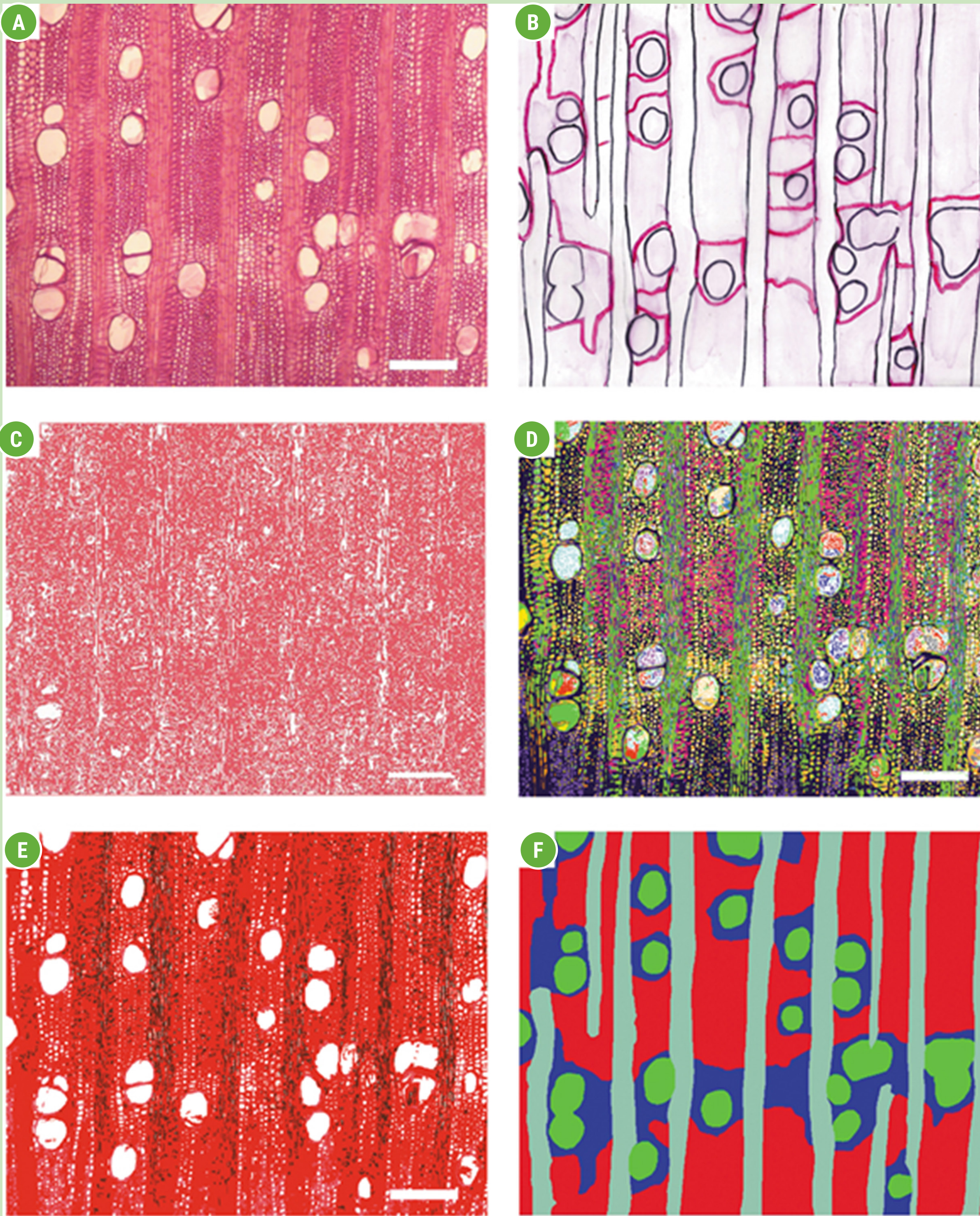
En la ***FIGURA 8*** se muestra el error medio cuadrático calculado para el método semi-automático y para la interpretación digital, para los cuales se obtuvo mayor error con las técnicas semi-automáticas y un menor error para la interpretación visual en pantalla. Para el método semi-automático, el menor REMC se obtuvo en *Pachira quinata* (X4990)



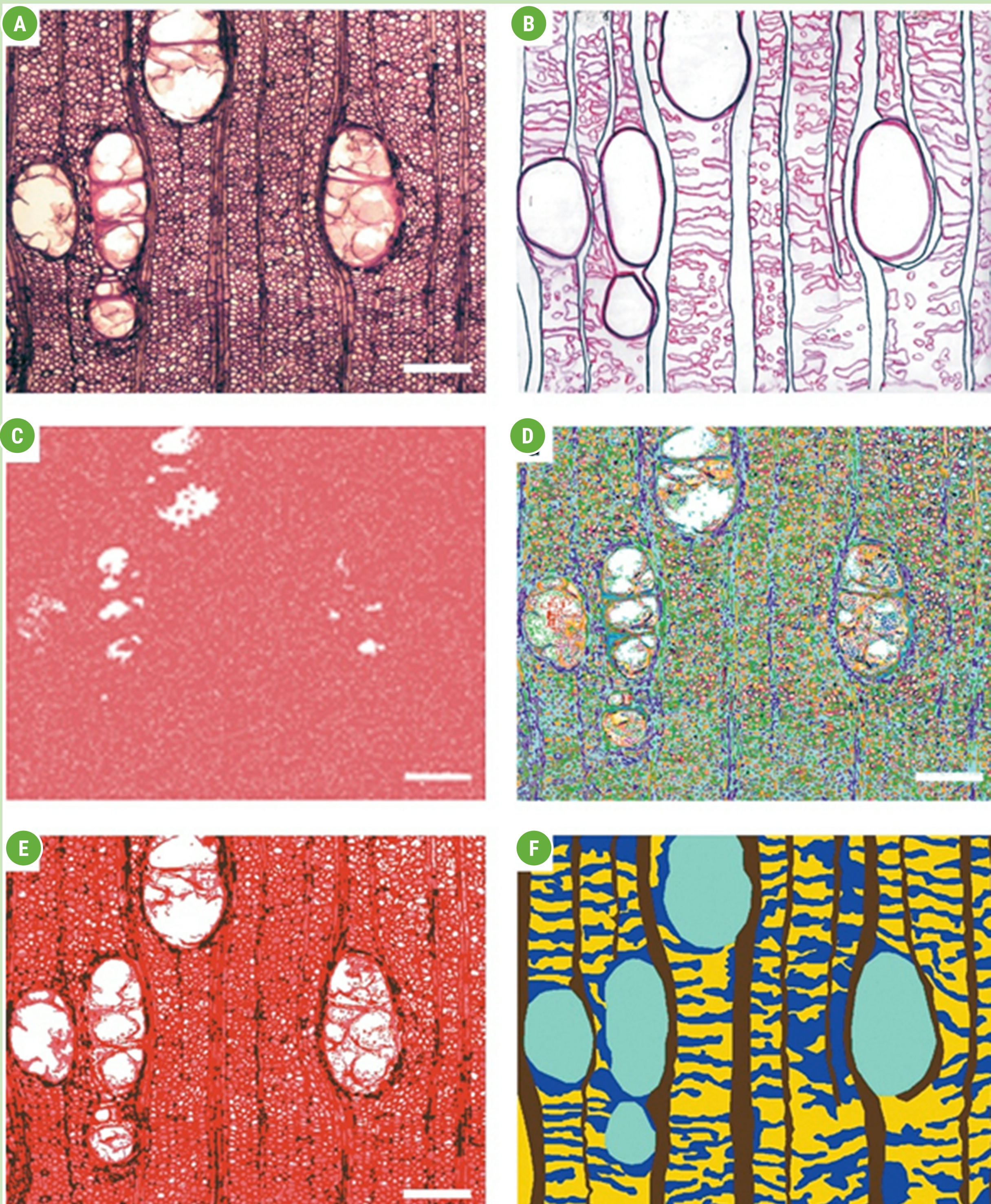
[FIGURA 1] *Hymenaea courbaril* (X5589): **[A]** Imagen original, corte transversal. **[B]** Imagen original copiada en una lámina de acetato para determinar áreas con el planímetro. **[C]** Imagen segmentada con parámetros de similaridad de 20 y área de pixeles de 40. **[D]** Imagen clasificada, clasificación no supervisada. **[E]** Imagen mapeada con 4 estructuras anatómicas (poros, parénquima, radios y fibras). **[F]** Interpretación digital. Escala= 300 μm.



[FIGURA 2] *Erisma uncinatum* (X203): **[A]** Imagen original, corte transversal. **[B]** Imagen original copiada en una lámina de acetato para determinar áreas con el planímetro. **[C]** Imagen segmentada con parámetros de similaridad de 6 y área de pixeles de 12. **[D]** Imagen clasificada, clasificación no supervisada. **[E]** Imagen mapeada con 4 estructuras anatómicas (poros, parénquima, radios y fibras). **[F]** Interpretación digital. Escala= 300 μm.



[FIGURA 3] *Gmelina arborea* (X6427-1c): **[A]** Imagen original, corte transversal. **[B]** Imagen original copiada en una lámina de acetato para determinar áreas con el planímetro. **[C]** Imagen segmentada con parámetros de similaridad de 12 y área de pixeles de 24. **[D]** Imagen clasificada, clasificación no supervisada. **[E]** Imagen mapeada con 4 estructuras anatómicas (poros, parénquima, radios y fibras). **[F]** Interpretación digital. Escala= 300 *μ*m.



[FIGURA 4] *Pachira quinata* (X4990): **[A]** Imagen original, corte transversal. **[B]** Imagen original copiada en una lámina de acetato para determinar áreas con el planímetro. **[C]** Imagen segmentada con parámetros de similaridad de 6 y área de pixeles de 12. **[D]** Imagen clasificada, clasificación no supervisada. **[E]** Imagen mapeada con 4 estructuras anatómicas (poros, parénquima, radios y fibras). **[F]** Interpretación digital. Escala= 300 μm.

CUADRO 7. Prueba de Tukey (α = 0,01) para los casos donde se rechazó la hipótesis nula.

Hymenaea courbaril		
Caracter	**a**	**b**
Altura de radios (µm)	394,00 (X5589 directo) 398,49 (X5589 digital)	532,00 (X5590 directo) 575,15 (X5590 digital)
Longitud de fibras (µm)	1350,17 (X5589 digital) 1419,6 (X5589 directo) 1491,41 (X5590 digital)	1419,60 (X5589 directo) 1491,41 (X5590 digital) 1577,80 (X5590 directo)
Erisma uncinatum		
Caracter	**a**	**b**
Diámetro de poros (µm)	209,80 (X203 directo) 211,12 (X203 digital)	241,84 (X4556 digital) 243,20 (X4556 directo)
Poros/mm^2	1,4400 (X203 directo) 1,4580 (X203 digital) 2,5580 (X4556 digital)	2,5580 (X4556 digital) 3,1200 (X4556 directo)
Altura de radios (µm)	439,58 (X203 digital) 459,40 (X203 directo) 498,40 (X4556 directo)	498,40 (X4556 directo) 536,85 (X4556 digital)
Longitud de elementos de vasos (µm)	347,20 (X203 directo) 420,65 (X4556 directo) 424,33 (X203 digital)	420,65 (X4556 directo) 424,33 (X203 digital) 506,47 (X4556 digital)
Longitud de fibras (µm)	1313,20 (X203 directo) 1314,09 (X203 digital)	1510,80 (X4556 directo) 1608,62 (X4556 digital)

Gmelina arbo	
Caracter	**a**
Diámetro de poros (µm)	88,26 (X6427-1cdigita 88,40 (X6427-1c direc 95,20 (X6427-1b direc
Radios/mm	5,3 (X6427-1b digital) 6,1 (X6427-1b directo)
Pachira quin	
Caracter	**a**
Diámetro de poros (µm)	243,20 (X4521 directo 258,96 (X4521 digital)
Diámetro de punteaduras (µm)	12,50 (X4521directo) 13,75 (X4521 digital) 14,23 (X4990 digital)
Longitud de fibras (µm)	1746,60 (X4990directo 1924,79 (X4990digital 1929,37 (X4521 digita

CUADRO 8. Tiempo

CARACTERÍSTICAS
Ø Poros
Frec· Poros
Ø Punteadura
Altura Radios
Radios/mm
GPF
LeV
LF

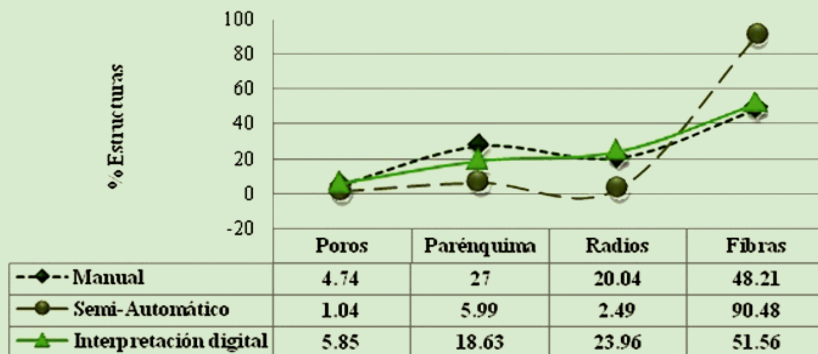
NOTA: Ø = Diámetro F

orea	
	b
l) to) to)	95,20 (X6427-1b directo) 107,24 (X6427-1b(digital)
)	6,1 (X6427-1b directo) 7,0 (X6427-1c digital) 7,1 (X6427-1c directo)
ata	
	b
))	302,80 (X4990 directo) 317,82 (X4990 digital)
	13,75 (X4521 digital) 14,23 (X4990 digital) 15,87 (X4990 directo)
o)) l)	1924,79 (X4990digital) 1929,37 (X4521 digital) 2048,40 (X4521 directo)

neto registrado durante las mediciones lineales con el método tradicional y las TIG para cada una de las especies.

TIEMPO (min)															
X5589		X5590		X203		X4556		X6427-1b		X6427-1c		X4521		X4990	
Directo	Digital	Directo	Digital	Directo	Digital	Directo	Digital	Directo	Digital	Directo	Digital	Directo	Digital	Directo	Digital
13	5	10	3,5	16	10	12	10	10	6	13	9	11	9	14	10
4	2	3	1,5	3	3	4	5	4	2	4	3	4	3	5	3
5	3	11	8	10	5	8	5	8	5	8	7	10	8	15	12
10	6	10	3	15	10	16	11	8	5,5	10	6	15	11	15	11
4	1,5	3	1	5	3	5	4,5	5	4	4	5	5	5	4	2
18	12	14	10	25	11	24	10	11	12	10	10	14	9	16	9
18	9	46	5	25	11	15	7	36	10	38	11	16	8	30	5
31	11	55	8	40	12	35	12	17	6	21	11	44	9	50	11

rec = Frecuencia LeV = Longitud de elementos vasculares LF= Longitud de fibras GPF = Grosor de las paredes de la fibra.



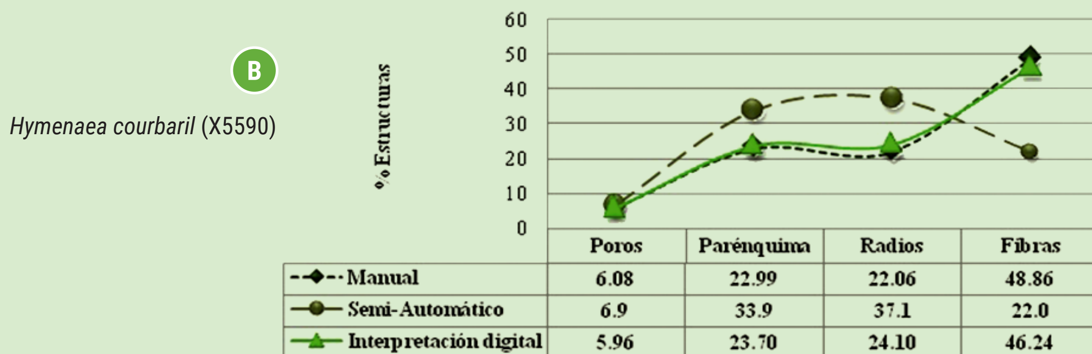
	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	4.74	27	20.04	48.21
Semi-Automático	1.04	5.99	2.49	90.48
Interpretación digital	5.85	18.63	23.96	51.56

A

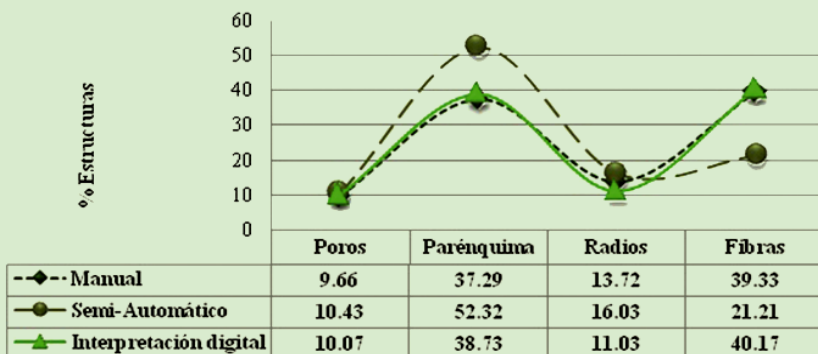
Hymenaea courbaril (X5589)

B

Hymenaea courbaril (X5590)



	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	6.08	22.99	22.06	48.86
Semi-Automático	6.9	33.9	37.1	22.0
Interpretación digital	5.96	23.70	24.10	46.24



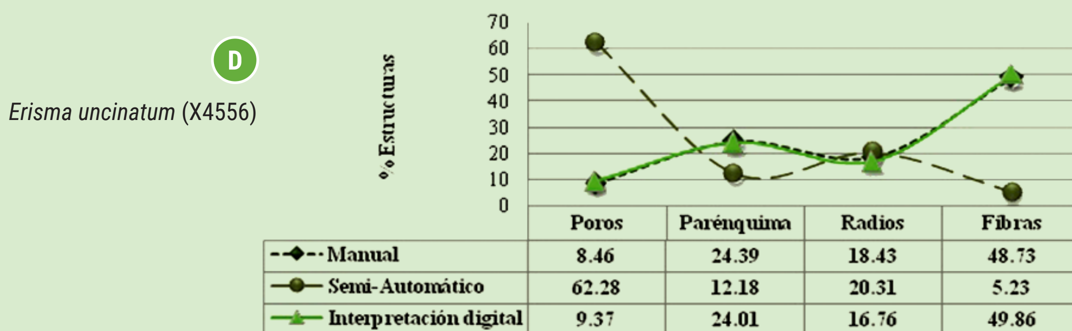
	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	9.66	37.29	13.72	39.33
Semi-Automático	10.43	52.32	16.03	21.21
Interpretación digital	10.07	38.73	11.03	40.17

C

Erisma uncinatum (X203)

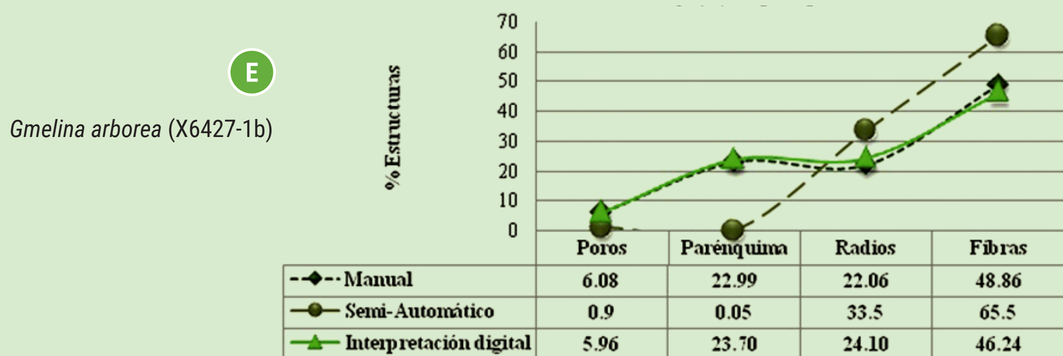
D

Erisma uncinatum (X4556)

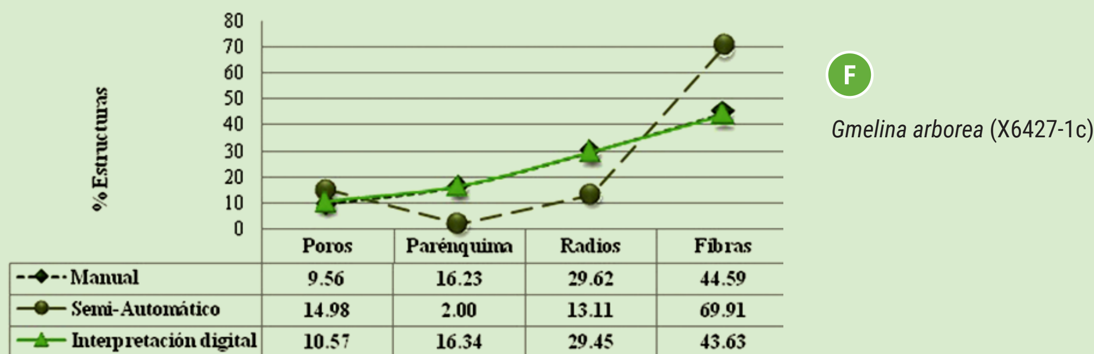


	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	8.46	24.39	18.43	48.73
Semi-Automático	62.28	12.18	20.31	5.23
Interpretación digital	9.37	24.01	16.76	49.86

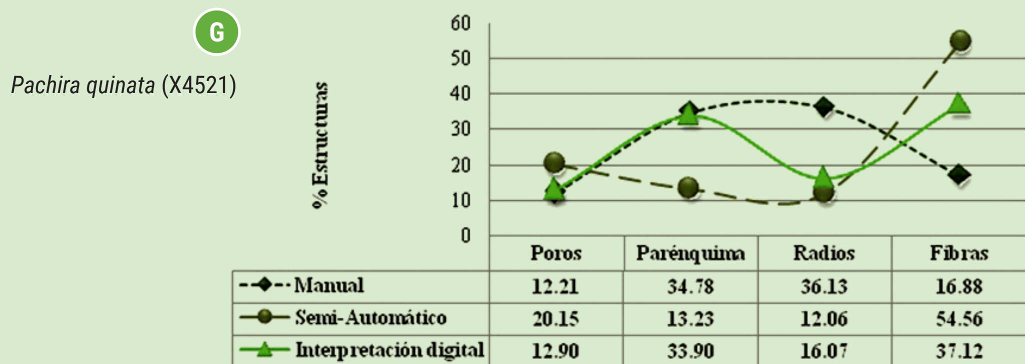
[FIGURA 5] Proporción de tejidos *Hymenaea courbaril* (X5589, X5590) y *Erisma uncinatum* (X203, X4556) por el método manual, semi-automático y la interpretación digital.



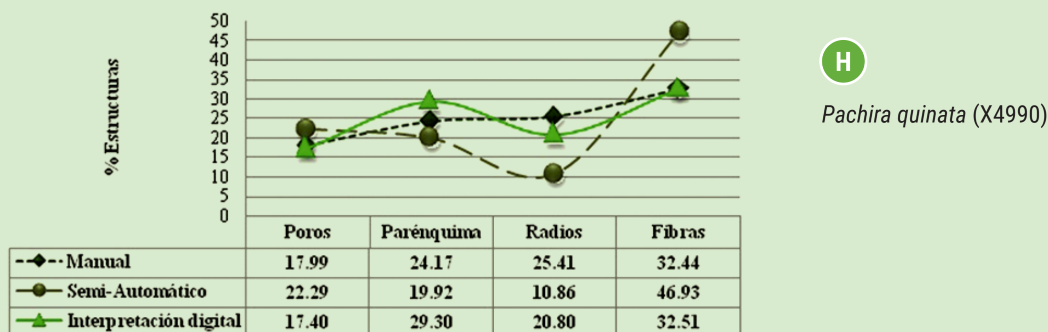
	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	6.08	22.99	22.06	48.86
Semi-Automático	0.9	0.05	33.5	65.5
Interpretación digital	5.96	23.70	24.10	46.24



	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	9.56	16.23	29.62	44.59
Semi-Automático	14.98	2.00	13.11	69.91
Interpretación digital	10.57	16.34	29.45	43.63

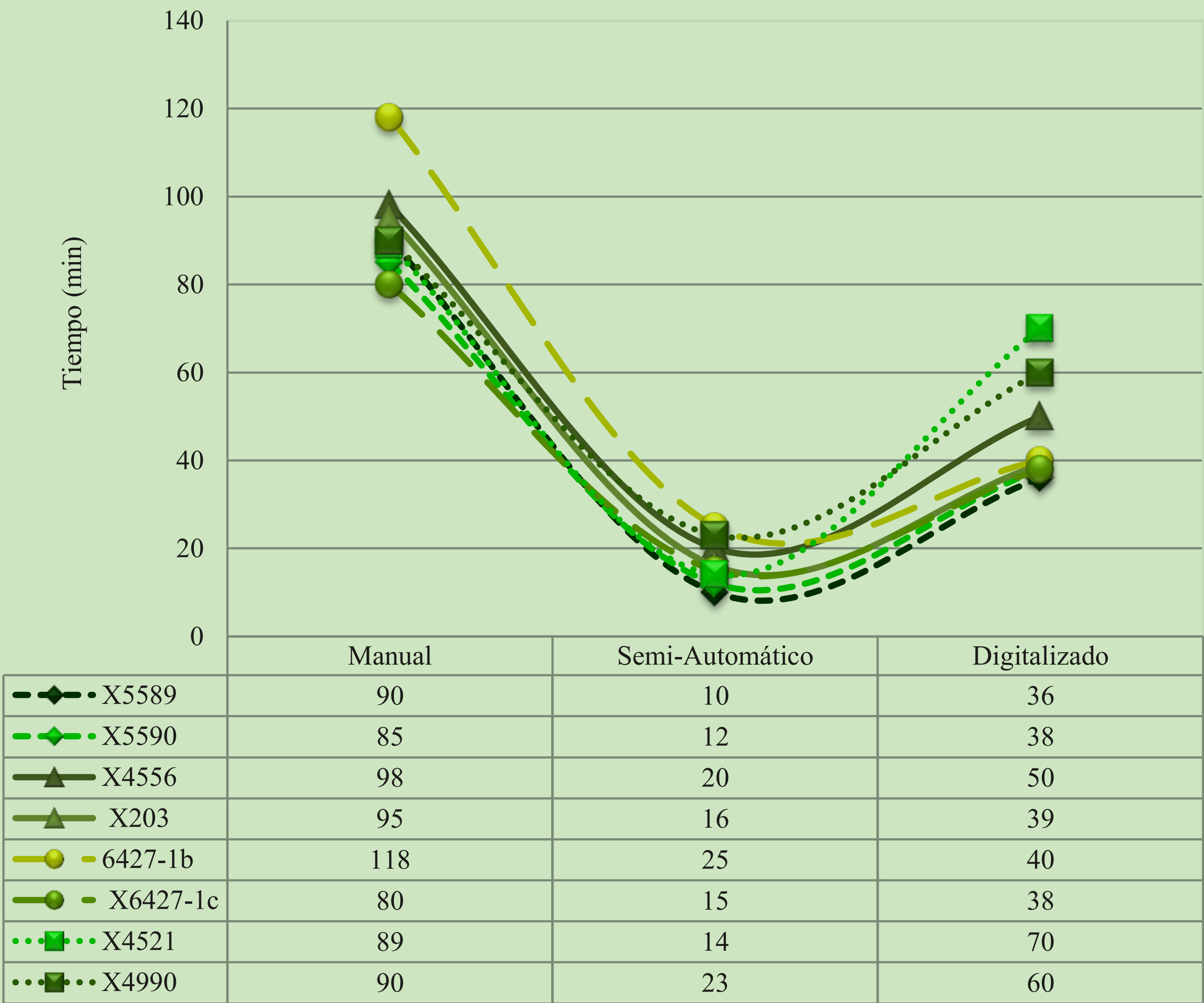


	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	12.21	34.78	36.13	16.88
Semi-Automático	20.15	13.23	12.06	54.56
Interpretación digital	12.90	33.90	16.07	37.12



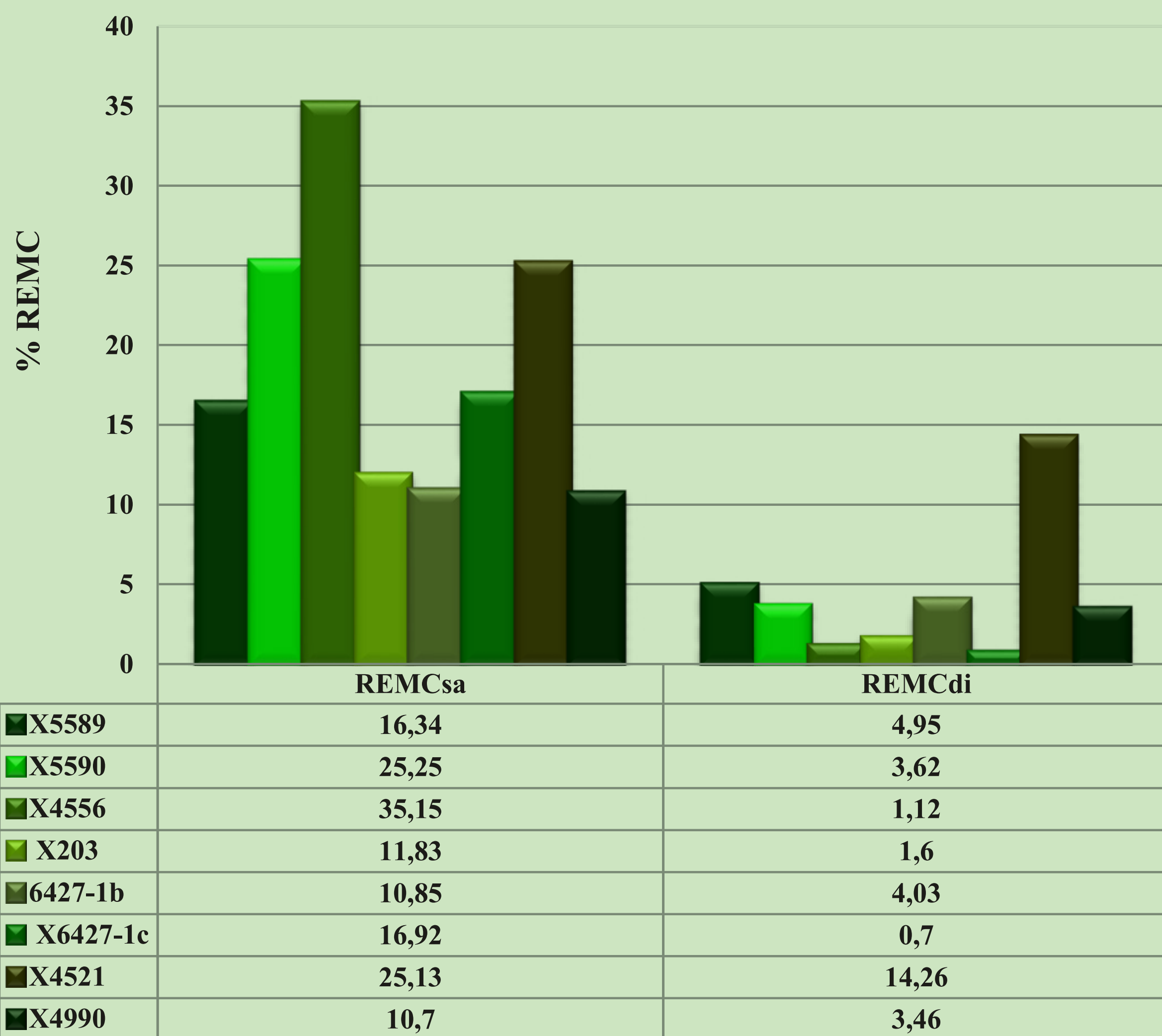
	Poros	Parénquima	Radios	Fibras
Manual	17.99	24.17	25.41	32.44
Semi-Automático	22.29	19.92	10.86	46.93
Interpretación digital	17.40	29.30	20.80	32.51

[FIGURA 6] Proporción de tejidos para *Gmelina arborea* (X6427-1b-X6427-1c) y *Pachira quinata* (X4521-X4990) por el método manual, la interpretación digital y el semi-automático.



	Manual	Semi-Automático	Digitalizado
X5589	90	10	36
X5590	85	12	38
X4556	98	20	50
X203	95	16	39
6427-1b	118	25	40
X6427-1c	80	15	38
X4521	89	14	70
X4990	90	23	60

[FIGURA 7] Tiempo neto registrado durante la determinación de las proporciones con el método tradicional y las TIG para cada una de las muestras anatómicas.



	REMCsa	REMCdi
X5589	16,34	4,95
X5590	25,25	3,62
X4556	35,15	1,12
X203	11,83	1,6
6427-1b	10,85	4,03
X6427-1c	16,92	0,7
X4521	25,13	14,26
X4990	10,7	3,46

[FIGURA 8] Raíz del error medio cuadrático calculado para el estudio de proporciones de cada una de las muestras anatómicas utilizando la medición tradicional como factor Medición real (medición real).

con 10,7 %, esto se atribuye a una mejor asignación del nivel digital (ND) de los pixeles durante la clasificación con el algoritmo ISOSEG. Por otra parte, el mayor REMC se presentó en *Erisma uncinatum* (X4556) con 35,15 %, lo que indica que se generó un grado significativo de confusión entre categorías durante la clasificación. Estas diferencias en valores de REMC señalan que las especies se comportan según el nivel espectral que presenten sus características anatómicas en las imágenes, generándose confusiones donde sus ND sean similares. De ahí la importancia de elegir un pre-procesamiento y de escoger unos parámetros adecuados para aplicar la segmentación además del tipo de clasificador.

En la interpretación digital, el menor REMC se presentó en *Gmelina arborea* (X6427-1c) con 0,7 % y el mayor correspondió a *Pachira quinata* (X4521) con 14,26 %. Estos errores dependieron de la dificultad del anatomista de la madera para interpretar los elementos leñosos en la interfaz del SIG, no obstante esta metodología presenta resultados favorables en este campo de investigación ya que arroja valores confiables al igual que la técnica actualmente utilizada, además de reducir el tiempo para la obtención de resultados correspondientes a las proporciones del tejido leñoso; resultados que coinciden con lo encontrado por Calderón (2010).

Las clasificaciones con el algoritmo ISOSEG para determinar las proporciones anatómicas con el método semi-automático se validaron a través de las matrices de confusión ***[CUADROS 9, 10]***, en comparación Espinosa *et al.* (2015) evaluaron el desempeño de la metodología de segmentación utilizando el mismo criterio; sin embargo sus resultados difieren de lo encontrado en esta investigación debido a que en ella se obtiene una tasa de acierto global del (89,1 %) la cual representa una segmentación adecuada de los elementos, demostrando una precisión más alta para la segmentación de poros y a pesar que en el presente trabajo la clase poros también presenta un mayor acierto, los valores de exactitud se ubicaron por debajo de (65,65 %) y la razón por la que se considera que Espinosa *et al.* (2015) alcanzaron un mayor nivel de precisión es debido al método utilizado para realizar las segmentaciones.

La evaluación de la exactitud de estas clasificaciones dependió de la proporción de pixeles correctamente asignados en la diagonal de las matrices de confusión ***[CUADROS 9, 10]***, expresando la poca confiabilidad del método semi-automático, además de distinguirse los dos tipos de error en base a las confusiones que presentaron los elementos anatómicos de las maderas estudiadas. Esto difiere de lo encontrado por Herrera *et al.* (2002), Rosado (2004), Espinoza y Herrera (2013) y Espinosa *et al.* (2015) quienes lograron diferenciar regiones o estructuras anatómicas con la aplicación de un algoritmo de segmentación y alcanzando resultados acertados con respecto a la proporción de tejidos. Esta diferencia se atribuye a la aplicación de una clasificación multiescala basada en operaciones morfológicas y al hecho de que no compararon los resultados derivados de la segmentación con las proporciones obtenidas con un método directo (planímetro digital). Para la exactitud de la clasificación fue necesario utilizar una fuente de información de mayor precisión que el material a evaluar

CUADRO 9. Matriz de confusión para *Hymenaea courbaril* y *Erisma uncinatum*.

MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA *Hymenaea courbaril* (X5589)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod.**	**% Err. Om.**
Poros	**8,78**	5,94	5,11	0,86	3,31	8,78	91,22
Parénquima	21,49	**15,88**	8,47	4,48	8,55	15,88	84,12
Radios	5,11	6,1	**4,88**	8,02	6,72	4,88	95,12
Fibras	64,62	72,08	81,54	**86,64**	81,42	86,64	13,36
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	15,33	34,18	18,06	54,22			
% Err. Com.	84,67	65,82	81,94	45,78			

MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA *Hymenaea courbaril* (X5590)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod·**	**% Err. Om.**
Poros	**40,8**	9,43	1,84	0,59	5,36	40,8	59,2
Parénquima	22,15	**50,04**	14,32	1	17,08	50,04	49,96
Radios	13,69	26,38	**52,63**	14,6	26,66	52,63	47,37
Fibras	23,35	14,14	31,2	**83,8**	50,89	83,8	16,2
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	45,05	69,04	48,46	75,68			
% Err. Com.	54,95	30,96	51,54	24,32			

MATRIZ DE CONFUSIÓN DE *Erisma uncinatum* (X203)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod.**	**% Err. Om.**
Poros	**40,02**	1,79	1,66	3,42	6,23	40,02	59,98
Parénquima	37,65	**50,34**	20,82	54,14	47,12	50,34	49,66
Radios	10,06	7,08	**53,31**	21,27	18,18	53,31	46,69
Fibras	12,27	40,8	24,21	**21,17**	28,47	21,17	78,83
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	64,34	42,66	33,87	28,63			
% Err. Com.	35,66	57,34	66,13	71,37			

MATRIZ DE CONFUSIÓN DE *Erismaun cinatum* (X4556)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod.**	**% Err. Om.**
Poros	**79,72**	2,47	21,55	29,1	49,91	79,72	20,28
Parénquima	8,92	**82,97**	17,62	2,81	16,84	82,97	17,03
Radios	10,45	12,56	**53,98**	48,88	27,67	53,98	46,02
Fibras	0,91	1,99	6,85	**19,22**	5,59	19,22	80,78
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	79,17	45,9	46,57	59,36			
% Err. Com.	20,83	54,1	53,43	40,64			

CUADRO 10. Matriz de confusión para *Gmelina arborea* y *Pachira quinata*.

MATRIZ DE CONFUSIÓN DE *Gmelina arborea* (X6427-1b)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod.**	**% Err. Om.**
Poros	**7,24**	9,76	8,27	9,53	8,92	7,24	92,76
Parénquima	0	**0,14**	0,14	0,19	0,15	0,14	99,86
Radios	43,86	31,27	**30,8**	28,61	30,61	30,8	69,2
Fibras	48,9	58,83	60,79	**61,67**	60,31	61,67	38,33
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	3,97	12,17	41,8	41,47			
% Err. Com.	96,03	87,83	58,2	58,53			

MATRIZ DE CONFUSIÓN DE *Gmelina arborea* (X6427-1c)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod.**	**% Err. Om.**
Poros	**71,77**	11,4	3,27	8,41	14,02	71,77	28,23
Parènquima	5,89	**6,2**	0,24	5,79	4,21	6,2	93,8
Radios	1,13	3,35	**22,09**	4,67	9,29	22,09	77,91
Fibras	21,22	79,05	74,4	**81,12**	72,48	81,12	18,88
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	53,8	23,93	71,03	48,55			
%Err. Com.	46,2	76,07	28,97	51,45			

MATRIZ DE CONFUSIÓN DE *Pachira quinata* (X4521)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod.**	**% Err. Om.**
Poros	**74,64**	24,49	19,26	8,22	24,05	74,64	25,36
Parénquima	8,35	**18,69**	7,39	9,76	12,19	18,69	81,31
Radios	6,46	13,62	**34,42**	11,72	15,46	34,42	65,58
Fibras	10,55	43,2	38,92	**70,3**	48,29	70,3	29,7
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	39,81	51,59	37,06	53,68			
% Err. Com.	60,19	48,41	62,94	46,32			

MATRIZ DE CONFUSIÓN DE *Pachira quinata* (X4990)							
Clases	**Poros**	**Parénquima**	**Radios**	**Fibras**	**Total**	**% Acc. Prod.**	**% Err. Om.**
Poros	**56,76**	4,98	1,51	9,09	14,53	56,76	43,24
Parénquima	21,88	**30,12**	13,27	23,8	23,07	30,12	69,88
Radios	1,53	8,09	**22,5**	3,17	8,43	22,5	77,5
Fibras	19,83	56,81	62,72	**63,94**	53,98	63,94	36,06
Total	100	100	100	100	**100**		
% Acc. Usu.	67,57	38,03	56,76	38,29			
% Err. Com.	32,43	61,97	43,24	61,71			

CUADRO 11. Valores de precisión global, coeficiente Kappa, parámetro de similaridad y área de segmentación en los individuos y especies estudiadas.

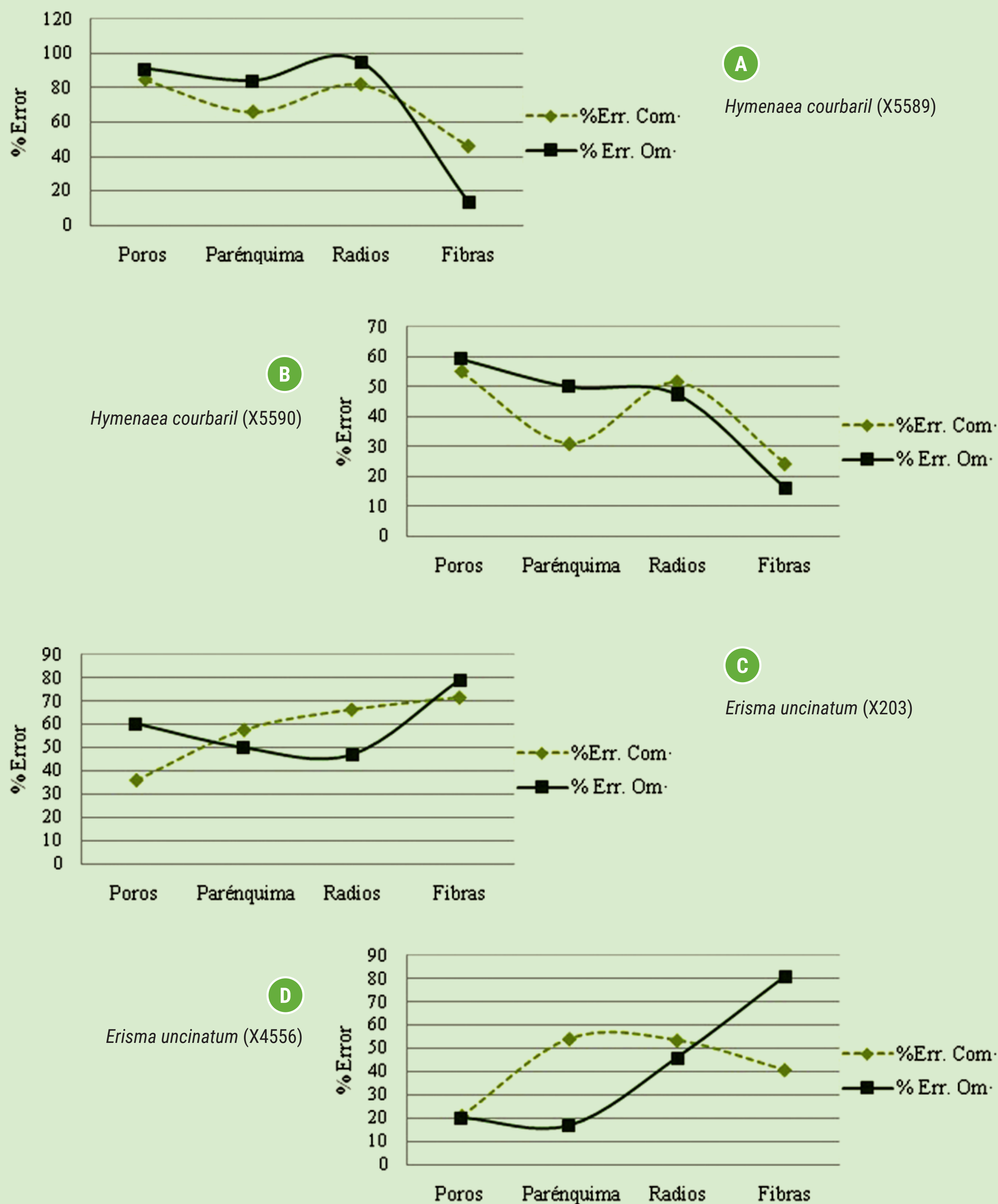
ESPECIE Y MUESTRA	Pg (%)	COEF. KAPPA	Ps	ASEGM. (PIXELS)
Hymenaea courbaril X5589	48,79	0,07	20	40
Hymenaea courbaril X5590	65,65	0,47	12	24
Erisma uncinatum X203	38,42	0,087	6	12
Erisma uncinatum X4556	63,44	0,447	6	12
Gmelina arborea X6427-1b	38,18	0,0088	4	8
Gmelina arborea X6427-1c	50,33	0,219	12	24
Pachira quinata X4521	47,52	0,275	12	24
Pachira quinata X4990	44,03	0,217	6	12

Pg: precisión global; **Ps**: parámetros de similaridad; **Coef. Kappa**: Coeficiente Kappa; **Asegm.**: área de segmentación.

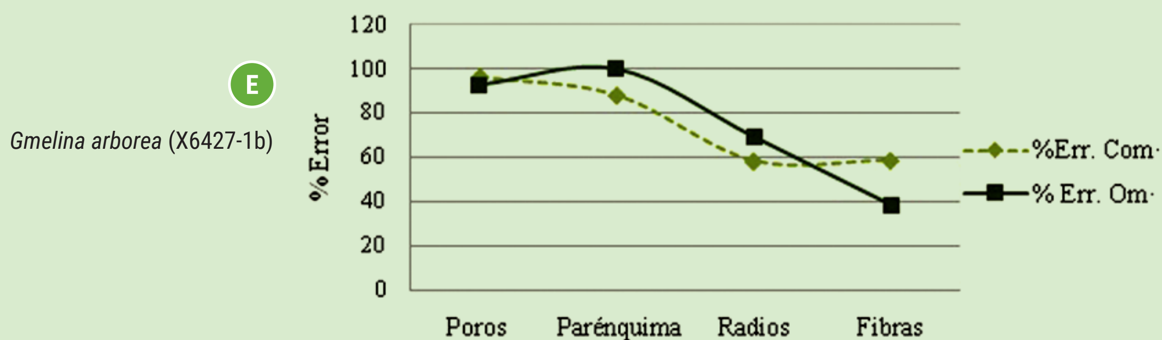
(Fallas, 2002) y utilizaron, como imagen real, la interpretación digital realizada por un experto en el área de la anatomía de maderas.

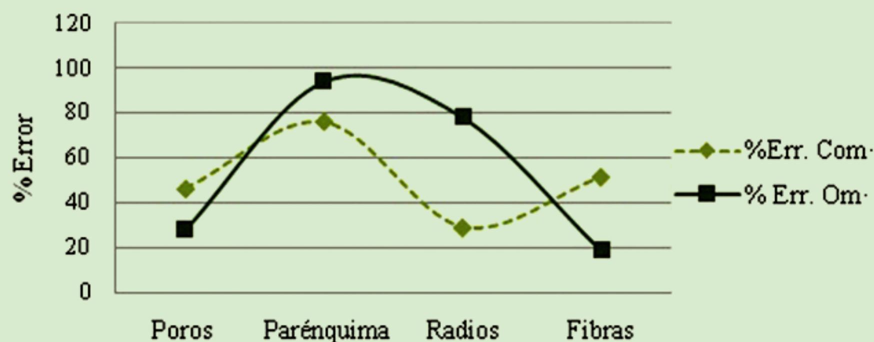
En cuanto a los errores de comisión y de omisión ***[FIGURAS 9, 10]***, los valores de precisión global para todas las especies fueron bajos en comparación con lo esperado por el experto en anatomía de la madera y poco aceptable para este tipo de estudio, ya que los rangos establecidos en las TIG se encuentran ubicados entre 80 a 95 % (Fallas, 2002). Por otra parte, la precisión global más alta alcanzada en este trabajo con respecto a la clasificación fue la de *Hymenaea courbaril* (X5590) con 65,65 % lo que indica que la imagen presentó los elementos anatómicos mejor definidos y que el contraste estuvo mejor representado en estas estructuras, por lo cual el algoritmo logró discriminar más entre las clases. Sin embargo, este valor sigue siendo bajo para la determinación de proporciones en la madera. La precisión global más baja se encontró para *Gmelina arborea* (X6427-1b) con 38,18 % lo que señala un alto grado de confusión entre sus elementos en la imagen, por lo tanto una confiabilidad baja para la determinación de proporciones.

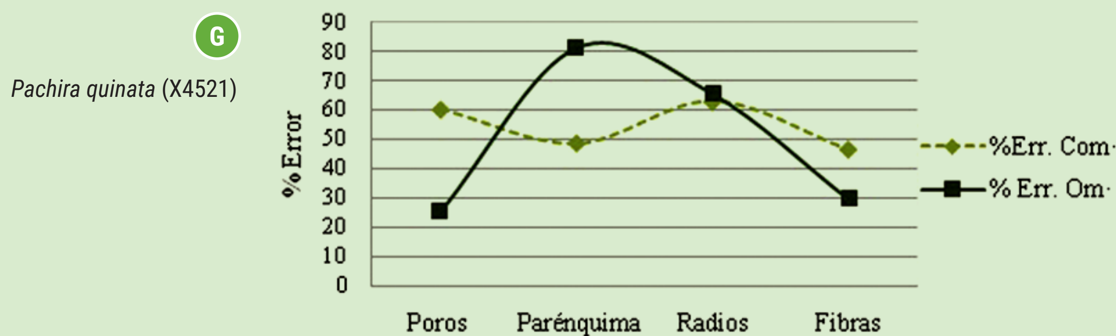
En cuanto al índice Kappa, el mejor resultado obtenido fue de 0,47 para *Hymenaea courbaril* (X5590), al igual que la precisión global, lo que indica que la coincidencia no es mejor que la producida al azar (Cohen, 1960), y que para esta especie los parámetros de similaridad de 12 y área de 24 pixeles arrojan buenos resultados para la segmentación y post clasificación de las fotomicrografías para determinar proporciones. En el cuadro 11 se presentan los valores obtenidos para la precisión global y el índice Kappa para cada

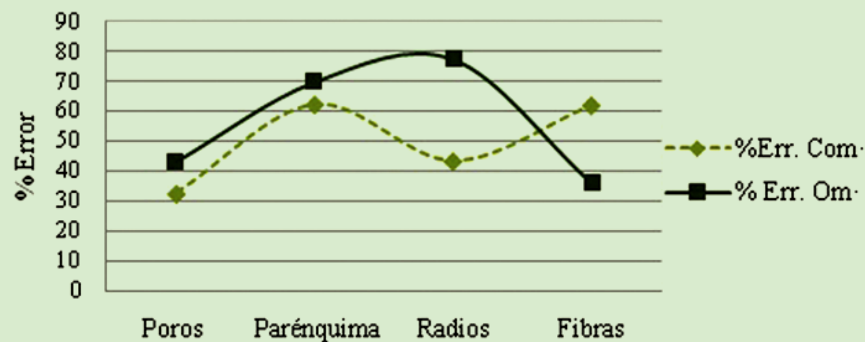


[FIGURA 9] Errores de omisión y comisión para las muestras *Hymenaea courbaril* (X5589, X5590) y *Erisma uncinatum* (X203, X4556).

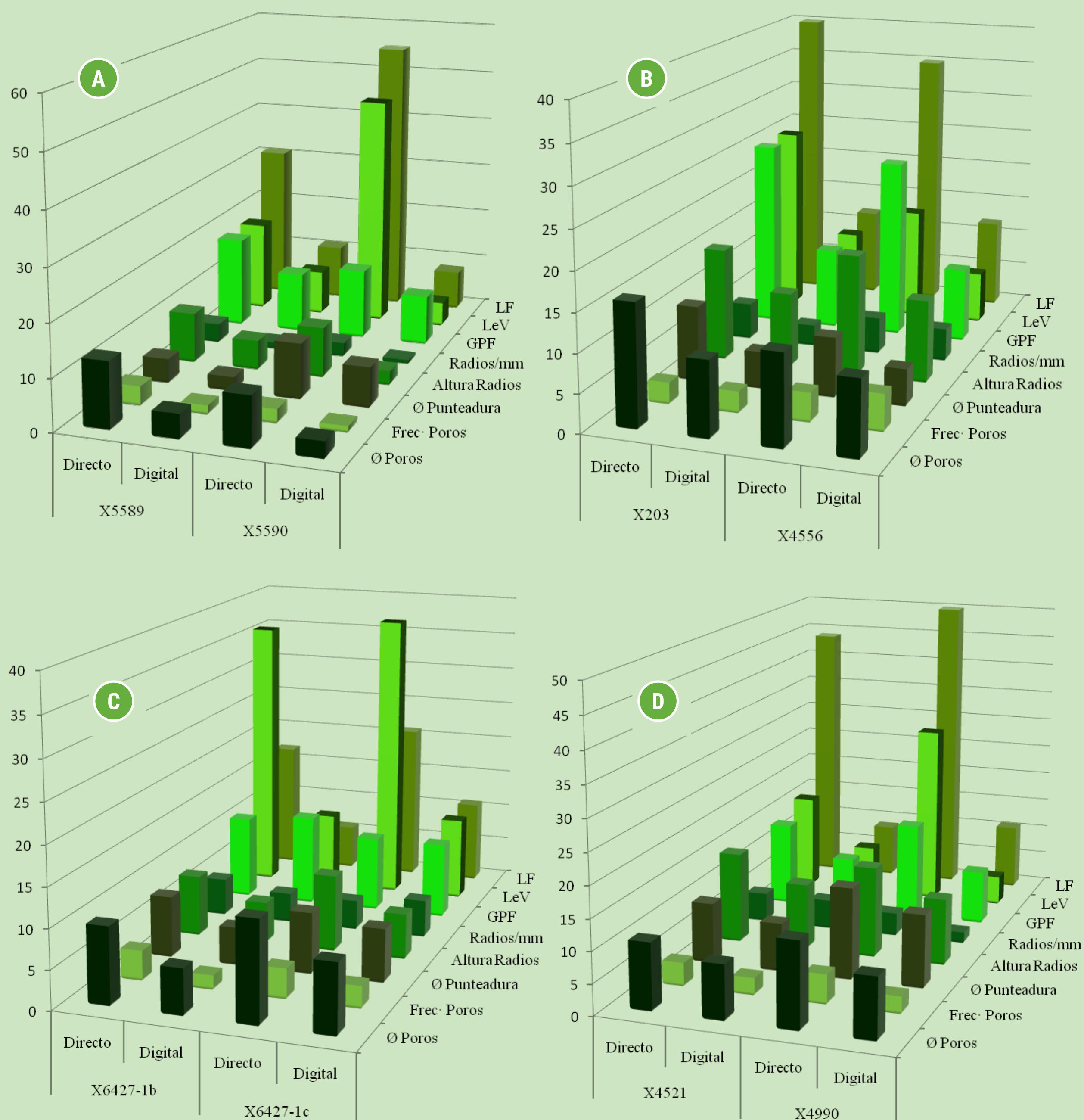








[FIGURA 10] Errores de omisión y comisión para las muestras *Gmelina arborea* (X6427-1b-X6427-1c) y *Pachira quinata* (X4521-X4990).



[FIGURA 11] Tiempo neto registrado durante las mediciones lineales con el método tradicional y las TIG para: **[A]** *Hymenaea courbaril*, **[B]** *Erisma uncinatum*, **[C]** *Gmelina arborea* y **[D]** *Pachira quinata*.

una de las especies e individuos estudiados y sus correspondientes parámetros de segmentación.

En el caso de los poros, Espinoza y Herrera (2013) presentan una segmentación en fotomicrografías de madera usando procesamiento digital de imágenes, empleando en primera instancia un análisis de texturas y usando la matriz de concurrencia de niveles de gris para encontrar regiones que pertenecen a poros, para finalmente obtener una segmentación más cercana a los bordes reales, comparando los resultados obtenidos con 12 segmentaciones realizadas manualmente por un experto obteniendo una precisión promedio de 96 %, mientras que en el presente trabajo se obtuvo una precisión menor debido a la presencia de goma, tílides y la pared celular que son elementos que produjeron un incremento en el porcentaje de desaciertos a la hora de determinar la proporción de poros en las fotomicrografías. En general, el mayor porcentaje de aciertos correspondió al tejido fibroso. Es imprescindible un pre-procesamiento de las fotomicrografías con el fin de eliminar el ruido en la muestra y realzar la textura de cada uno de sus componentes antes de ser segmentados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con respecto a las mediciones lineales, para las cuatro especies estudiadas, se observó que los dos métodos de medición (directo y digital) arrojan resultados similares. Esto indica la validez del TIG como herramienta en la determinación de las características dimensionales en los elementos xilemáticos cuantitativos.

El tiempo implementado durante las mediciones lineales fue mayor para casi todos los elementos cuantificados por especie utilizando el método directo.

Con relación a la determinación de proporción de poros, parénquima axial, fibras y radios, la interpretación visual en pantalla arrojó resultados similares a los obtenidos con el método manual. El método semiautomático sólo mostró resultados confiables en la proporción de poros; mientras que con respecto al parénquima, radios y fibras se encontraron resultados que difieren de los valores obtenidos con el método directo (manual).

Entre el método manual y la interpretación visual en pantalla, en todos los casos existió similitud en cuanto a la proporción de tejidos excepto en una muestra de *Hymenaea courbaril* (X5589) y las dos de *Pachira quinata* (X4521 y X4990). En la primera, la diferencia se presentó en el tejido parenquimático, donde los valores obtenidos por la interpretación visual en pantalla estuvieron muy por debajo de lo indicado por el método manual. En *Pachira quinata* las diferencias se presentaron a nivel de tejido parenquimático axial y radial. Esta última especie se caracteriza por tener poco contraste entre algunos de sus elementos anatómicos, especialmente entre el parénquima y las fibras, por ser estas últimas de paredes delgadas.

Los tiempos de medición utilizando TIG agilizan el proceso de manera eficaz. El método semiautomático fue la herramienta de medición que arrojó menores tiempos empleados, pero no garantiza precisión

en todos los tejidos estudiados. En contraste, la interpretación visual en pantalla garantiza más precisión aunque el tiempo empleado es mayor que el de la metodología semiautomática pero considerablemente menor al tiempo empleado con el método directo.

Las TIG brindan una interfaz mucho más cómoda a la hora de realizar mediciones, además de herramientas capacitadas para adaptar las características de los elementos anatómicos a las mediciones a realizar.

Tomando en cuenta la notable reducción de tiempo con el método semiautomático, se recomienda seguir investigando esta herramienta para ver la posibilidad de obtener resultados más precisos mediante el pre-procesamiento de las fotomicrografías antes de realizar procesos de segmentación y clasificación para eliminar el ruido y evitar confusiones entre los elementos anatómicos al momento de estudiar las proporciones de tejido en la madera. Este pre-procesamiento consistirá en un análisis de imágenes digitales que comprende correcciones, mejoras y una extracción de la información.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Julio Maldonado R. del Laboratorio de Anatomía de Maderas (Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales) por la preparación del material de estudio, en especial por su colaboración incondicional. A la profesora Norquis Peña de la Escuela de Ingeniería Forestal (Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales) por su asesoramiento en el análisis estadístico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA B., E. 2014. Desarrollo de herramientas de ArcGIS para el cálculo de indicadores físicos y socioeconómicos de cuencas hidrográficas (Doctoral dissertation).

CALDERÓN, D. 2010. *Determinación de características anatómicas cuantitativas en madera de* ***Gmelina arborea*** *utilizando SIG como herramienta de medición*. Universidad de Los Andes. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela (Tesis de grado).

COHEN, J. 1968. Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological bulbletin* 70(4): 213-220.

COROTHIE, H. 1967. *Estructura anatómica de 47 maderas de la Guayana venezolana y clase para su identificación.* Ministerio de Agricultura y Cría. Universidad de Los Andes. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Mérida. Venezuela.

COHEN, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46.

CONGALTON, R. y GREEN, K. (2009). *Assesing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices*. London, New York, CRC Press: Taylor and Francis Group.

CHUVIECO, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, España.

CHUVIECO, E. 2008. *Teledetección ambiental*. 3ª edición. Ariel Ciencia. Barcelona. España.

DONALDSON, L. A. y M. LAUSBERG. 1998. Comparison of conventional transmitted light and confocal microscopy for measuring wood cell dimensions by image analysis. *IAWA J*. 19: 321–336.

ESPEJO, N. C. y M. RAMÍREZ H. 2013. *Manual de prácticas de procesamiento digital de imágenes con el programa Spring 5.2.1*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. CIAF. Bogotá DC. Colombia.

ESPINOZA DE PERNÍA, N. y A. QUINTERO. 1988. *Identificación de maderas dicotiledóneas asistida por microcomputador.* Instituto Forestal Latinoamericano. Mérida, Venezuela.

ESPINOZA DE PERNÍA, N. y R. MILLER. 1991. Adapting the IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification to DELTA. *IAWA Bull. n.s.* 12: 34-50.

ESPINOSA M., L. y R. HERRERA. 2013. *Segmentación de poros en fotografías de microanatomía de madera usando procesamiento digital de imágenes.* XV Feria y Convención Internacional Informática.

ESPINOSA F., L. HERRERA J., R. y POLANCO T., C. 2015. Segmentación de elementos anatómicos en imágenes microscópicas de madera usando técnicas de visión artificial. *Maderas-CiencTecnol* 17.

ESRI. 2010. Environmental Systems Research Institute, Inc. En línea:http://www.esri.com[Consultado:15/01/2015].

EXELIS. 2012. Introducing ENVI 5 The nextgeneration of imageanalysis. En línea: http://www.exelisvis.com/Support/Forums/tabid/184/forumid/6/threadid/12838/scope/posts/Default.aspx [Consultado:18/03/2015]. Marzo 18, 2015.

FALLAS, J. 2002. *Normas y estándares para datos geoespaciales*. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.

FRANKLIN, G. 1937. Permanent preparations of macerated wood fibres. *Trop. Woods* 49: 21-22.

FUJIWARA, S. 1992. Anatomy and properties of japanese hardwoods II: Variation of dimensions of ray cells and their relation to basic density. *IAWA Bull. n.s.* 13(4): 397-402.

FUJIWARA, S., K. SAMESHINA, K. KURADA y N. TAKAMURA. 1991. Anatomy and properties of japanese hardwoods I: Variation of fibre dimensions and tissue proportions and their relation to basic density. *IAWA Bull. n. s.* 12(4): 419-424.

GARCÍA, O., L. PENCUE y S. GAONA. 2009. Sistema de extracción de características microestrucutrales de sistemas cerámicos utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes. *Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (1), 327-333.

GONZÁLEZ, G., L. VALENZUELA, J. MUÑOZ, J. GONZÁLEZ y J. CHAVEZ. 2011. Tecnología para cuantificar conductos anatómicos en frutales caducifolios Caso de estudio Nogal Pecanero (***Carya illinoensis*** Koch). *Revista Chapingo* 10: 113-116.

HERRERA, R., H. RONCANCIO, H. VELASCO, C. POLANCO y J. ROSADO. 2002. Segmentación de imágenes de microanatomía de madera mediante una clasificación multiescala basada en operaciones morfológicas. *Ingeniería* 7: 64-72.

IAWA COMMITTEE.1989. List of microscopic features for hardwood identification. international association of wood anatomists. *IAWA Bull. n.s.* 10: 217-332.

ILIC, J. 1993. Computer aided wood identification using CSIROID. IAWA *Bull. n.s.* 14: 333-340.

KURODA, K. 1987. Hardwood identification using a microcomputer and IAWA codes. *IAWA Bull. n.s.* 8: 69-77.

LILLESAND, T. y R. KIEFER. 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4a edition. John Wiley and Sons. New York, USA.

MATHER, P. M. y M. KOCH. 2011. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. 4a edition. Wiley-Blackwell. Chichester, UK.

MILLER, R. 1980. Wood identification via computer. *IAWA Bull. n.s.* 1: 154-160.

ORMEÑO, S. 1993. Teledetección fundamental. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica, Universidad Politécnica.

PACHECO, C., A. BARRIOS y J. LÓPEZ. 2007. Comparación de métodos de digitalización para el ingreso de información espacial a los sistemas de información geográfica. *Revista Forestal Latinoamericana*, 41: 57-74.

PASHA, C. LA y E. WHEELER.1987. A microcomputer based systemfor computer aided wood identification. *IAWA Bull. n.s.* 8: 357-354.

RICHARDS, J. 1999. *Remote sensing digital image analysis*. Springer-Verlag. London, UK.

ROSADO, J. 2004. Evaluación de la metodología diseñada para la caracterización e identificación de estructuras microanatómicas de maderas. *Colombia Forestal*, 8: 130-145.

ROSENFIELD, G. H. y FITZPATRICK-LINS, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetricengineering and remotesensing*, 52(2): 223-227.

ROSERO, J., PÉREZ, P., MOREANO, V., VERA, A., ORTEGA D., TAPIA A., LLACSAHUANGA J., CORONADO P., ZUÑIGA C., LOZANO C., SILVEIRA M., CHAVESTA M. 2011. *Aplicación de la técnica de análisis de imagen digital para caracterización y medición de elementos xilemáticos de especies forestales*. IX Congreso Nacional Forestal Ix Conafor (pp. 249-256). Huancayo: Universidad Nacional del Centro de Huancayo.

SCHOLZ, A., M. KLEPSCH, Z. KARIMI y S. JANSEN. 2013. How to quantify conduits in wood? *Frontiers in plantscience*, 4: 1-11.

SHIMABUKURO, Y. E., DUARTE, V., DOS SANTOS, J. R., MELLO, E. M. K., MOREIRA, J. C., MOREIRA, M. A. y DE FREITAS, U. M. 1997. *Metodología para la creación del PRODES digital y del banco de datos digitales de la Amazonia proyecto BADDAM*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales INPE.

STEPPE, K., V. CNUDDE, C. GIRARD, R. LEMEUR, J. P. CNUDDE y P. JACOBS. 2004. Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. *Journal of Structural Biology*, 148: 11-21.